

Toni Jylhä

**AERODYNAAMISEN KENTTÄTESTIJÄRJESTELMÄN
MEKAANINEN TOTEUTUS**

AERODYNAAMISEN KENTTÄTESTIJÄRJESTELMÄN MEKAANINEN TOTEUTUS

Toni Jylhä
Opinnäytetyö
Kevät 2017
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, tuotantotalous

Tekijä: Toni Jylhä

Opinnäytetyön nimi: Aerodynaamisen kenttätestijärjestelmän mekaaninen toteutus

Työn ohjaajat: Helena Tolonen, Jani Korpinen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2017

Sivumäärä: 49 + 1 liite

Opinnäytetyössä suunniteltiin mekaaninen toteutus painettavaa elektroniikkaa testaavaan aerodynaamiseen kenttätestijärjestelmään. Opinnäytetyö on toteutettu yhteistyössä oululaisen teknologiayrityksen Haltian Oy:n kanssa. Opinnäytetyöprosessin aikana tehtiin yhteistyötä myös Oulun ammattikorkeakoulun painettavaa elektroniikkaa tuottavan PrinLab-kehityslaboratorion kanssa.

Kenttätestijärjestelmän mekaanisen suunnittelun tavoitteena oli suunnitella materiaalivalintoja ja valmistusmenetelmiä myöten riittävän luja, toimiva, helposti rakennettava ja asennettava sekä säädettävissä oleva testijärjestelmä. Varsinaisena tehtävänä oli suunnitella ja mallintaa testijärjestelmän osista takasiipi ja päätylevyt. Lisäksi tuli suunnitella ratkaisu ilmanopeusmittarin ja savukoneen integroimiseksi kenttätestijärjestelmään.

Mekaniikkasuunnittelussa käytettiin SolidWorks-suunnitteluohjelmaa, jonka avulla mallinnettiin kenttätestijärjestelmä ja suunniteltiin kenttätestijärjestelmän osista takasiipi, päätylevyt ja etusiipi. Kenttätestijärjestelmää testattiin virtaussimuloinnilla, mistä tuloksina saatiin takasiiven painejakaumat ja virtauskuvat.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin suunniteltua toimiva ja työlle asetettuja vaatimuksia vastaava testijärjestelmä, jota on tarkoitus testata käytännön testien lähitulevaisuudessa. Opinnäytetyössä tuotettujen simulointien tuloksia voidaan hyödyntää vertailutuloksina käytännön testien tuloksille. Opinnäytetyön yhteistyökumppanina toiminut yritys voi hyödyntää kenttätestijärjestelmää osana omia tuotekehitysprosesseja.

Asiasanat: 3D-suunnittelu, aerodynamiikka, mekaniikkasuunnittelu, painettu elektroniikka, suunnitteluprosessi

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree programme in Mechanical Engineering, Production Economics

Author: Toni Jylhä
Title of thesis: Mechanical Design of Aerodynamic Test System
Supervisors: Helena Tolonen, Jani Korpinen
Term and year when the thesis was submitted: spring 2017 Pages: 49 + 1 appendix

The objective of this Bachelor's thesis was to design a mechanical implementation for an aerodynamic test system. The aerodynamic test system will later function as a test platform for testing a sensor film made with printed electronics manufacturing methods. This Bachelor's thesis was carried out in co-operation with a technology company, Haltian Ltd. During the thesis work process, there was also co-operation with PrinLab, a printed electronics development laboratory, which is located at Oulu University of Applied Sciences.

The aim of the mechanical design work was to design a robust, functional, easy-to-construct and adjustable test system. The main parts to design were the rear wing and end plates of the test system. In addition, a solution was designed to integrate the speedometer and the smoke machine into the test system.

The mechanical design work for the test system and its selected components was done with SolidWorks software. After designing the functionality of the test system, the test system was simulated with SolidWorks Flow Simulation.

As a result of this Bachelor's thesis, a functional test system was developed that will be tested in practice in the near future. The results of the Flow Simulation produced in this thesis can be used as comparative results for the results of practical tests. The company that has worked as a partner in the thesis project can utilize the field test system as part of their own product development processes.

Keywords: 3D-design, aerodynamics, design process, mechanical design, printed electronics

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
1.1 Haltian Oy	7
1.2 PrinLab	8
2 VIRTausMEKANIikka	9
2.1 Aerodynamiikka	9
2.2 Virtauslajit	9
2.3 Reynoldsin luku	10
2.4 Siipiprofiiliin vaikuttavat voimat	10
2.5 Sakkaus	12
3 PAINETTU ELEKTRONIIKKA	14
3.1 Hyödyt	14
3.2 Sovellukset	15
3.3 Tulevaisuuden näkymä	15
3.4 Kenttätestijärjestelmän sensorikalvo	16
4 SUUNNITTELUPROSESSI	17
4.1 Tuoteohjelman suunnittelu	17
4.2 Esisuunnittelu	20
4.3 Yksityiskohtainen suunnittelu	21
4.4 Prototyypin valmistus ja testaus	22
4.5 Tuotannon käynnistäminen	24
5 KENTTÄTESTIJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA VALMISTUS	25
5.1 Takasiipi	26
5.1.1 NACA-profiili	26
5.1.2 Suunnittelu	26
5.2 Päätylevy	28
5.3 Etusiipi	29
5.4 Muut kenttätestijärjestelmässä käytetyt komponentit	32
5.4.1 Kulmarautakisko	32

5.4.2 Ilmanopeusmittari	32
5.4.3 Savukone	34
5.4.4 Raidetanko	35
5.5 Siipiprofiilien ja päätylevyjen valmistus	36
6 KENTTÄTESTIJÄRJESTELMÄN TESTAUS	38
6.1 Simulointi	38
6.2 Simuloinnin tulokset	39
6.2.1 Ensimmäinen simulointi	39
6.2.2 Toinen simulointi	43
7 YHTEENVETO	46
LÄHTEET	48
LIITTEET	
Liite 1 Kokoonpanopiirustus	

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä suunnitellaan mekaaninen toteutus aerodynaamiselle kenttätestijärjestelmälle. Kenttätestissä testataan siipeen laminoitua Oulun ammattikorkeakoulun (Oamk) PrinLabissa valmistettavaa painettua elektronista sensorikalvoa. Kenttätestijärjestelmä asennetaan Oamkin auto- ja moottorilaboratorion testiauton katolle asennettavien taakkatelineiden päälle. Tärkeimpänä tavoitteena on suunnitella riittävän luja, toimiva, helposti rakennettava ja asennettava sekä säädettävä testijärjestelmä. Tähän kuuluu myös sopivimpien materiaalien ja valmistusmenetelmien valinta.

Opinnäytetyönä olevan kenttätestijärjestelmän mekaniikkasuunnittelun laatuksiteerit ja vaatimukset on asetettu yhdessä yhteistyökumppani Haltian Oy:n sekä opinnäytetyötä ohjaavan opettajan kanssa. Tämä opinnäytetyön raportti sisältää aerodynaamisen kenttätestijärjestelmän suunnittelun kannalta keskeisen teoriapohjan, mallinnettavien mekaanisten osien suunnitteluprosessit ja kuvauksen suunnittelutyön tuloksista.

1.1 Haltian Oy

Haltian Oy on elektroniikan suunnitteluun ja tuotteistamiseen erikoistunut teknologiayritys. Haltian Oy:llä on asiantuntemusta ja kokemusta IoT-tuotteista, tuotesuunnittelusta sekä antureilla ja radiotekniikalla varustellusta miniatyrisoidusta mekaniikasta. Haltian Oy on perustettu syyskuussa 2012. Yrityksen päätoimitilat sijaitsevat Oulussa. Yrityksellä löytyy toimipiste myös Yhdysvalloissa Indianapoliksen osavaltiossa. (1.)

Haltian Oy aloitti toimintansa vuonna 2012 viiden henkilön voimin, jotka kuuluivat aikaisemmin Nokian huipputuotekehitysryhmän asiantuntijoihin. Haltian Oy on kasvanut nopeasti, ja yritys on yksi Pohjois-Suomen nopeimmin kasvaneista yrityksistä. Yrityksen henkilöstöllä on keskimäärin 15 vuotta kokemusta langattoman teknologiateollisuuden kanssa. (1.)

Haltian Oy tarjoaa palveluja langattoman tuotekehityksen suunnitteluun, konseptityöhön, HW- ja mekaniikkasuunnitteluun, ohjelmistosuunnitteluun sekä RF-

ja antennisuunnitteluun. Haltian Oy tekee laajaa yhteistyötä muiden yritysten kanssa tarjotakseen etuja kaikille osapuolille ja varsinkin asiakkailleen. Laaja yhteistyö muiden yritysten kanssa mahdollistaa niin sanotun yhden luukun palvelun, jossa hankinta- ja alihankintavelvollisuus poistetaan asiakkaalta ja hoidetaan Haltianissa. (1.)

1.2 PrinLab

PrinLab on painettavan elektroniikan kehityslaboratorio, joka sijaitsee Oulun ammattikorkeakoulun toimitiloissa. Laboratoriossa harjoitetaan ja tutkitaan lukuisia eri painotekniikoita ja niiden sovelluksia. PrinLab tekee yhteistyötä yliopistojen ja tutkimuslaitosten kanssa painetun elektroniikan alalla. Laboratorion laitteistoon kuuluvat mustesuihkutulostin, silkkipainokone, mikrodispensiolaite, tarkkuuspainokone ja näiden oheislaitteet. Laboratoriossa sen työntekijät, tutkijat ja opiskelijat testaavat käytännön ideoita. PrinLab on osa palkittua Printo-Centin pilot factory -konseptia. Oulun ammattikorkeakoulu keskittyy painettavan elektroniikan sovelluksissa pienten ja keskisuurten yritysten kanssa tehtävään yhteistyöhön, koska näillä yrityksillä on rajalliset mahdollisuudet testata erilaisia sovelluksia. (2; 3.)

2 VIRTausMEKANIikka

Virtausmekaniikka tutkii nesteitä ja kaasuja. Virtausmekaniikka on jatkuvan aineen mekaniikan osa-alue. Virtausmekaniikka jaetaan muun muassa virtausdynamiikkaan ja hydrostaatiikkaan. Virtausdynamiikka tutkii liikkuvia nesteitä ja kaasuja, joita hyödynnetään paljon aerodynamiikan sovellutuksissa. (6, s. 1.)

2.1 Aerodynamiikka

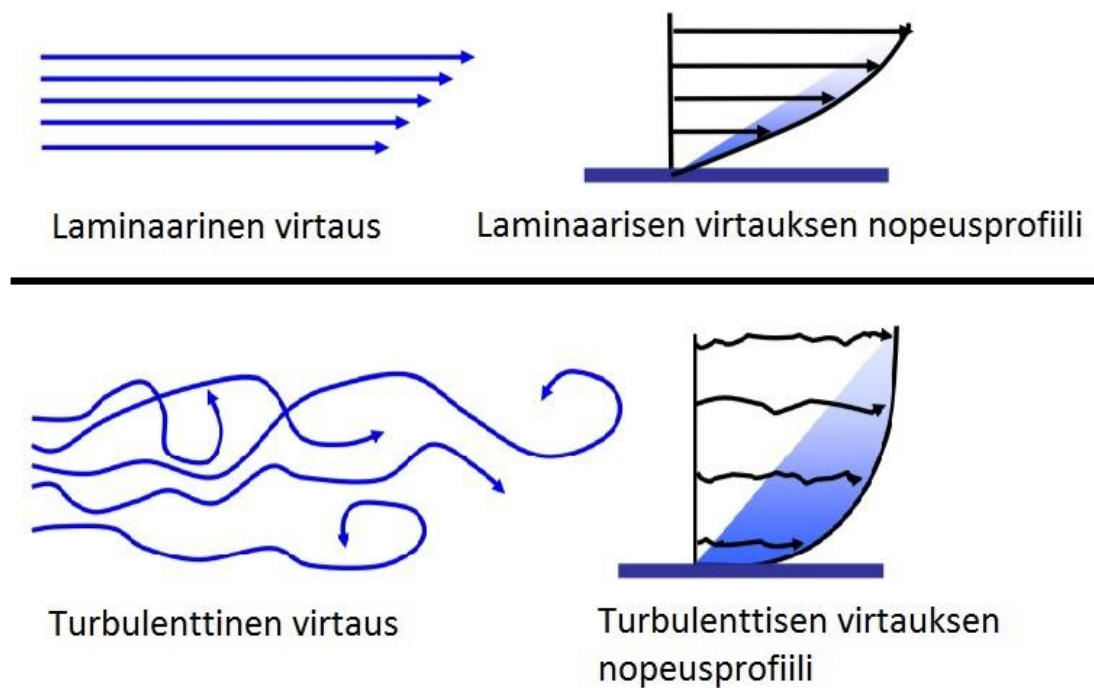
Aerodynamiikka on yksi virtausmekaniikan osa-alueista. Lyhyesti ilmaistuna se on ilmapirtauksiin sovellettavaa virtausmekaniikkaa, ja sen avulla tutkitaan voimia, jotka syntyvät tai muuttuvat, kun

- paikallaan oleva kiinteä kappale kohtaa liikkeessä olevan ilman
- kiinteä kappale liikkuu ilmassa
- ominaisuuksiltaan erilaiset ilmapirtaukset vaikuttavat toisiinsa. (12.)

Aerodynamiikassa tutkitaan myös erilaisia voimia, jotka vaikuttavat lentokoneeseen ja sen siipiin, esimerkiksi nostovoima, vastus tai konetta kallistava momentti. Näihin voimiin vaikuttavat myös lentokoneen rungon ja siipien geometriat. (6, s. 1.)

2.2 Virtauslajit

Virtaus jaetaan kahteen luokkaan, laminaariseen ja turbulenttiseen (kuva 1). Kun virtaus on häiriötöntä ja kitkatonta, virtaus on laminaarinen. Laminaarisessa virtauksessa ilmahiukkaset kulkevat virtaviivaisesti ja yhdensuuntaisesti eivätkä ne sekoitu toisiinsa. Turbulenttisessa eli kitkallisessa virtauksessa ilmahiukkaset liikkuvat epäjärjestyksessä ja niiden epämääräiset liikkeet aiheuttavat keskinäistä kitkaa. Virtauksen sisäinen nopeuden ailahtelu aiheuttaa suuren joukon pyörteitä virtauksen sisällä. Turbulenttinen virtaus etenee tiettyyn suuntaan, mutta sen nesteosaset voivat hetkellisesti liikkua toiseen suuntaan. (6, s. 22.)



KUVA 1. Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus (12)

2.3 Reynoldsin luku

Reynoldsin lukua käytetään erottamaan virtauslajit toisistaan. Kun virtaavan aineen virtauksen nopeus kasvaa, muuttuu virtaus laminaarisesta turbulenttiseksi. Reynoldsin luku on laaduton ja virtaus on laminaarista, kun laskettu Reynoldsin (Re) luku on pienempi kuin kriittinen Reynoldsin (Re_{kr}) luku. Kun laskettu Reynoldsin (Re) luku on suurempi kuin kriittinen Reynoldsin (Re_{kr}) luku, on virtaus turbulenttista. Laminaarisen virtauksen muutos turbulenttiseksi ei tapahdu yhtäkkiä virtausnopeuden kasvaessa, vaan on olemassa alue, jolla se on molempia virtauslajeja yhtä aikaa. Tätä aluetta kutsutaan myös siirtymäalueeksi. (7, s. 175.)

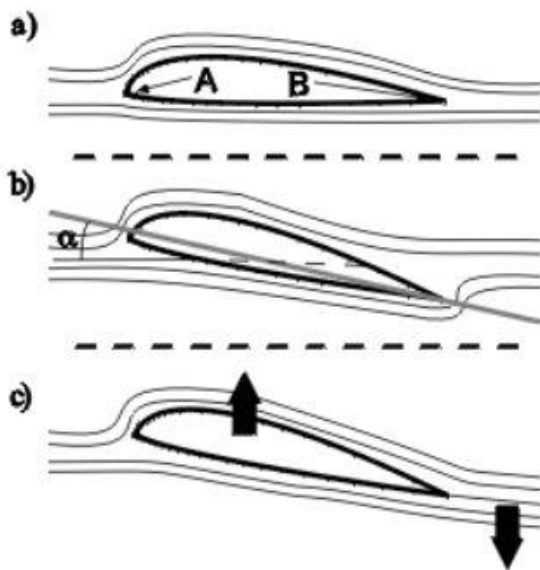
2.4 Siipiprofiiliin vaikuttavat voimat

Siipiprofiilin aerodynaamisiin ominaisuuksiin vaikuttavat siiven muodon ominaisuudet eli tasomuoto, paksuusjakautuma ja kierto. Siipiprofiilin kohtauskulma määrittää siiven kohdistuvat paine-erot siiven ala- ja yläpinnalla. (6, s. 81.)

Tulovirtaukseksi kutsutaan kaukana siiven edessä kulkevaa virtausta. Siipiprofiilin jänteen ja tulovirtauksen välinen kulma voidaan mieltää kohtauskulmaksi. Kohtauskulma vaikuttaa oleellisesti siipiprofiilin yläpinnalle kohdistuvaan paineeseen. Kohtauskulman kasvattamisella voidaan siirtää siipiprofiilin etureunan painopistettä alapintaa pitkin taaksepäin. Kun kohtauskulma on suuri ($\alpha = 10\text{--}15^\circ$), siipiprofiilin yläpintaa pitkin kulkeva virtaus joutuu patopisteestä lähtien kiertämään etureunan, jolloin etureunan läheisyyteen syntyy alipainepiikki ja sitä myötä nopeushuippu. (6, s. 83.)

Alipainepiikki liittyy virtauksen pieneen kaarevuussäteeseen, koska paineen täytyy kasvaa pinnasta ulospäin kaarevassa liikkeessä ollessaan, jotta virtaaviin ilmaosasiin vaikuttaa niitä kaarevalla radalla pitävä voima. Profiilin pinnalla vallitsevan paineen on oltava pienempi kuin ulkoilman paine, koska kaukana profiilista paine on sama kuin ulkoilman paine. (6, s. 84.)

Kuvan 2 a-kohdassa kohtauskulma on nolla, jolloin ei synny nostetta siivelle. A- ja B-merkinnät kuvaavat patopisteitä. Kuvan 2 b-kohdassa kohtauskulmaa α on hieman kasvatettu. Kuvan 2 c-kohdassa kohtauskulmaa on kasvatettu enemmän, jolloin ilmaan kohdistuu alaspäin vaikuttava voima ja siipeen ylöspäin vaikuttava voima. (15.)



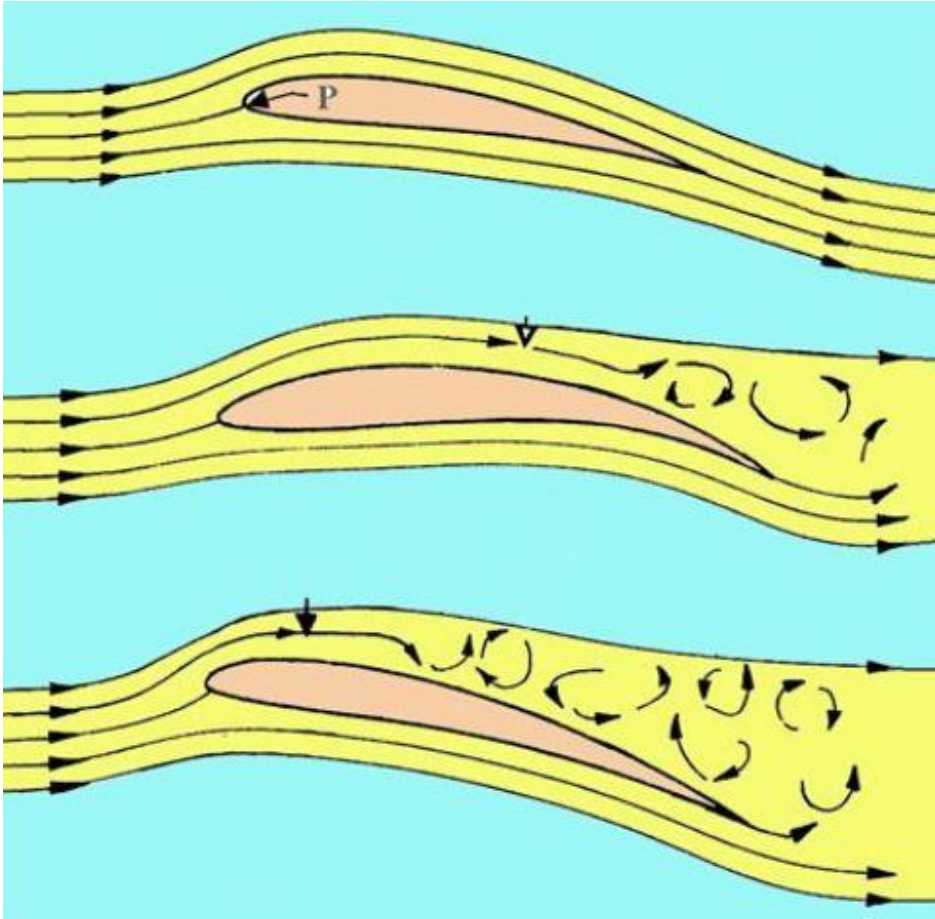
KUVA 2. Ilmanvirtaus siipiprofiilin ympärillä eri kohtauskulmilla (15)

2.5 Sakkaus

Symmetrisellä profiililla nostovoimakerroin on nolla kohtauskulman myös ollessa nolla. Nostovoimakerroin kasvaa suoraan verrannollisena kohtauskulmaan nähden, kun kohtauskulmaa kasvatetaan. Nostovoimakäyrä alkaa poiketa suorasta kaartuen alaspäin, kun kohtauskulma ylittää 10–15°. Poikkeamaan vaikuttavat myös profiilin muoto ja Reynoldsin luku. Tavanomaisten profiilien nostovoimakertoimen maksimiarvo on noin 1,3–1,6 ja tällöin kohtauskulma on noin 15–18°. (6, s. 87.)

Sakkaukseksi kutsutaan ilmiötä, jossa nostovoimakerroin pienenee äkillisesti maksimiarvon jälkeen. Sakkaus johtuu virtauksen irtaantumisesta profiilin alalta yläpinnalla. Maksiminopeus kasvaa yläpinnalla profiilin kohtauskulmaa kasvattaessa ja jättöreunalla miniminopeus pysyy ennallaan. Tällöin virtaus hidastuu suhteessa kohtauskulman kasvamiseen. Kohtauskulman kasvaessa tiettyyn pisteeseen virtaus profiilin takaosassa ei enää pysy kiinni profiilin pinnalla, koska virtauksen hidastuminen on liian voimakasta. Virtaus muuttuu myös samalla turbulenttiseksi, jolloin siipi ei enää käännä virtausta, eikä tuota nostovoimaa. Irronnut virtaus pitää sisällään suurehkoja ajan mukana satunnaisesti vaihtelevia nopeuden ja paineen heilahteluja. (6, s. 89.)

Kuvan 3 ylimmässä kohdassa näkyy, kuinka virtaus etenee siipiprofiilin pintaa pitkin ja siipi ei ole vielä tässä vaiheessa sakannut. Keskimmaisessä kohdassa virtaus yläpinnalla on osittain irronnut. Alimmassa kohdassa sakkaus on edennyt kohti etureunaa ja koko siipiprofiili on lähes sakkaustilassa. Tästä johtuen nostovoima laskee ja vastus kasvaa voimakkaasti. (15.)



KUVA 3. Sakkauksen eteneminen (14)

3 PAINETTU ELEKTRONIIKKA

Painettu elektroniikka on painotekninen menetelmä, jossa elektroniikka painetaan materiaaliin käyttäen erilaisia painotekniikoita. Perusidea painetussa elektroniikassa on se, että perinteiset elektroniset ratkaisut ja komponentit pystytään painamaan ohuisiin ja joustaviin materiaaleihin. Painojälki vie hyvin vähän tilavuutta ja yleisimpinä alustamateriaaleina käytetään erilaisia muoveja. Tulevaisuudessa paperi tulee myös olemaan yksi potentiaalinen alustamateriaali. Ohut ja joustava alustamateriaali sekä painojäljen pieni tilavuus antavat paljon uusia mahdollisuuksia tuotekehitykselle verrattuna perinteiseen elektroniikkaan, jossa raskaammat ja suuremmat komponentit vievät huomattavasti enemmän tilavuutta. (8.)

Painetussa elektroniikassa johteita, puolijohteita ja dielektrisiä materiaaleja käytetään painomusteena painoprosessissa. Painoprosessissa ne painetaan tietylle alustalle, kuten ohuelle ja joustavalle muovialustalle. Painetussa elektroniikassa käytetään tavanomaisia painotekniikoita, jotka ovat olleet olemassa jo useita satoja vuosia. Näitä ovat esimerkiksi silkki-, flexo-, kuumapuristus-, syväpaino- ja mustesuihkutekniikka. (8.)

Painetun elektroniikan valmistusmenetelmä on kasvanut elektronisen valmistusteknologian kehityksen myötä viimeaikaisessa painoteknisessä valmistusmenetelmässä ja sen käyttöalue on merkittävästi laajentamassa yhdistämällä kyseinen teknologia elektroniikkasovellusten nanomateriaaleihin. (9, s. 5.)

3.1 Hyödyt

Painettavaa elektroniikkaa on kustannustehokasta valmistaa, koska se on nopea valmistusmenetelmä ja sillä on erittäin pieni materiaalihukka. Painetun elektroniikan valmistusmenetelmä mahdollistaa myös suurten pinta-alojen sovellukset ja ”piirilevynä” voidaan käyttää joustavaa ja ohutta alustaa, joka voi olla halutun muotoinen. Painettu elektroniikka säästää tuotannon materiaaleja ja alentaa kuluja, koska joustavat ja ohuet painomateriaalit mahdollistavat laajan alueen elektroniikan painon sekä pienoiskoon sovellukset. (8.)

Painetun elektroniikan painotekniikat mahdollistavat hybridituotteiden valmistuksen, jossa yhdistyvät painetun elektroniikan komponentit perinteisillä tuoteominaisuuksilla. Näitä voidaan käyttää monenlaisiin sovelluksiin, koska tämä koko ajan kehittyvä tekniikka tarjoaa kasvavat markkinat tuotekehitykselle. (3.)

Painettua elektroniikkaa on paljon ympäristöystävällisempää valmistaa verrattuna perinteisen elektroniikan valmistukseen. Painetussa elektroniikassa ympäristöystävällisyys tarkoittaa sitä, että sen valmistuksessa ei käytetä myrkyllisiä aineita tai harvinaisia maametalleja. Painetun elektroniikan valmistus tarvitsee myös vähemmän energiaa sekä valmistusprosessissa että toiminnassa. Kiinteän ja nestemäisen jätteen väheneminen valmistuksessa on painetun elektroniikan keskeinen piirre. (9, s. 8.)

3.2 Sovellukset

Painettavan elektroniikan yleiset käyttökohteet ovat esimerkiksi erilaiset komponentit ja anturit. Peruskomponentteja, kuten keloja, vastuksia ja kondensaatoreita, on suhteellisen helppoa ja tehokasta valmistaa. (8.)

Tällä hetkellä tärkeimmät sovelluskohteet ovat muun muassa

- OLED-näytöt
- erilaiset sensorit
- aurinkokennot
- muistit
- radiotaajuuteen perustuva tunnistamisteknologia (RFID)
- antennit
- kosketuspaneelien käyttöliittymät. (9, s. 8 - 18.)

3.3 Tulevaisuuden näkymä

Painetun elektroniikan kehitys on parhaillaan kovassa nosteessa. Kehitys heijastuu orgaanisten ja oksidipohjaisten puolijohteiden nopeaan kehittymiseen. Lukuisten tutkimushankkeiden takia koko ajan löydetään uusia materiaaleja, joita hyödyntää kyseisessä tekniikassa. Tämä kuitenkin vie aikaa, koska uusien materiaalien kanssa tehtyjen tuotteiden tuominen markkinoille vaatii paljon tutki-

musta ja kehitystä. Painetun elektroniikan alalla on edelleen monia mielenkiintoisia kysymyksiä, joita on käsiteltävä teoreettisesti ja kokeellisesti. Orgaanisten ja oksidipohjaisten puolijohteiden sisäisten rajojen tutkiminen herättää kiinnostusta tutkia mahdollisia uusia materiaaleja, mikä lisää painettujen puolijohteiden perusominaisuuksien ymmärrystä. Paineretun elektroniikan isoimpia haasteita ovat valmistusmetodien sekä suunnitteluohjelmistojen ja -sääntöjen vakiintumattomuus. (9, s. 119.)

3.4 Kenttätetstijärjestelmän sensorikalvo

Painettua elektroniikkaa sisältäviä sensorikalvoja valmistettiin opinnäytetyön kenttätetstijärjestelmää varten PrinLabissa kolme erilaista kappaletta, ja niitä testataan kenttäolosuhteissa kesällä ja syksyllä 2017. Aiemmat prototyypit ovat toimineet odotetulla tavalla, mutta niiden johdotuksissa on ollut luotettavuushaasteita, joita PrinLabissa tehtävillä kalvoilla on todennäköisesti hyvin vähän.

4 SUUNNITTELUPROSESSI

Suunnittelutyön tuotekehitysprosessissa käytetään usein systemaattisen suunnittelun mallia, joka voidaan jakaa useisiin erilaisiin suunnitteluvaiheisiin. Tässä opinnäytetyössä on hyödynnetty viisivaiheista suunnittelumallia. Kyseiseen suunnittelumalliin kuuluvat

- tuoteohjelman suunnittelu
- esisuunnittelu
- yksityiskohtainen suunnittelu
- prototyypin valmistus ja testaus
- tuotannon käynnistäminen. (13.)

4.1 Tuoteohjelman suunnittelu

Tuoteohjelman suunnitteluvaihe keskittyy suunniteltavan tuotteen tarpeen taustoihin ja havaintoihin. Impulssi tuotteen kehittämiseksi voidaan saada esimerkiksi tarkastelemalla ja analysoimalla asiakkaan tarpeita, kritiikkiä sekä tutkimalla markkinoita ja kilpailijoita tuotteiden teknisen ja taloudellisen etumatkan kartoittamiseksi. Suunnitteluvaiheen virike voidaan saada myös havainnoimalla ympäristöä ja sen mahdollisia kehittämiskohteita sekä tuotesuunnittelijan omasta tarpeesta suunnitella kyseinen tuote. (4, s. 55; 5, s. 122)

Vaatuslistan laatiminen kuuluu olennaisena osana tuoteohjelman suunnitteluvaiheisiin. Laadittaessa tuotteen vaatimuksia tulee ottaa huomioon vaaditut tavoitteet ja rajoitukset. Tällä menettelyllä vältetään kehittelemästä virheellisiä toimintamalleja. Vaatimuksia voidaan tarkemmin kategorisoida lopputuotteen ominaisuuksiin peilaten. Vaatimukset tulee ilmoittaa täsmällisinä lukuarvoina, mutta selkeästi muotoilut sanalliset lausumat ovat hyväksyttäviä, mikäli täsmällinen lukuarvoina ilmoittaminen ei ole mahdollista. Suunnitteluvaiheessa vaatimuksiin erotellaan kiinteät vaatimukset (KV), vähimmäisvaatimukset (VV) ja toivomukset (T). Vaatuslistan asiakokonaisuudet voivat liittyä mihin vain tuotekehityksen vaiheeseen tai lopputuotteen ominaisuuksiin. Kiinteitä vaatimuksia voivat olla

esimerkiksi vaatimukset liittyen tuotteen geometriaan ja turvallisuuteen. Vähimmäisvaatimukset voivat liittyä tuotteen toimintomahdollisuuksiin ja toivomukset tuotteen muokattavuuteen. (4, s. 64; 5, s. 80.)

Vaatimuslista dokumentoidaan, jotta vaatimusten täyttymistä voidaan arvioida tuotekehitysprosessin myöhemmissä vaiheissa ja se toimii samalla myös todistena sovitusta vaatimuksista suunnittelevalle sekä tuotteen tilaavalle taholle. Vaatimuslistan rakenne dokumentoinnissa on vapaa ja yritykset voivat muokata siitä tarpeitaan vastaavan. Rakenteesta käyvät kuitenkin ilmi vaatimukset luokitukseen ja arvoineen yrityksen laatukriteerien mukaisesti. (4, s. 64 - 65.)

Suunniteltavalle tuotteelle asetetaan vaatimuslistan ensimmäisen vaiheen mukaisesti kiinteät vaatimukset, joiden tulee täytyä kaikissa tilanteissa. Kiinteät vaatimukset muodostuvat aina tuotteen tilaajan asettamien tarpeiden ja yrityksen omien laatuvaatimusten mukaan. (5, s. 80.)

Kiinteiden vaatimusten lisäksi tuotteelle asetetaan myös vähimmäisvaatimukset, joiden on täytyttävä ennalta asetettuun vähimmäisarvoon saakka. Vähimmäisarvon ylitymisellä toivottuun suuntaan on yleensä myönteinen vaikutus tuotteen lopulliseen laatuun. (5, s. 80.)

Vaatimuslistan kolmannessa osiossa käsitellään tuotteelle asetettuja toivomuksia, jotka otetaan mahdollisuuksien mukaan huomioon tuotteen suunnitteluprosessissa ja joiden suhteen sallitaan yleensä sovittu lisäkustannus. Tuotteen toivomukset ovat yleisimmin hyvin asiakaslähtöisiä ja tuotteelle lisäarvoa tuovia, mutta eivät vaikuta tuotteen laatukriteerien täyttymiseen, ellei tavoitteena ole vastata täysin asiakkaan toiveisiin, jolloin kyse on puolestaan kiinteistä ja vähimmäistavoitteista. (5, s. 80.)

Tämän opinnäytetyön lopputuotteen suunnittelun tarve tuli suoraan asiakkaan omista tarpeista suunnitella kenttätestijärjestelmä, joka olisi helposti testattavissa ja menetelmä hyödynnettävissä yrityksen oman tuotteen tuotekehitysprosessissa. Kenttätestijärjestelmän vaatimuslistaa laadittaessa pääkohdat olivat

- yksinkertainen, kohtauskulmaltaan portaittain säädettävä symmetrinen siipi päätylevyineen ja kiinnitysmekanismineen
- painetun elektronisen laitteen, elektroniikkamoduulin ja tarvittavan johdotuksen sovittaminen siipeen
- savukoneen suutin varustettuna yksinkertaisella kohtauskulman ja korkeuden säädöllä
- ilmanopeusmittarin eli pitot-putken kiinnitysmekanismi varustettuna yksinkertaisella kohtauskulman ja korkeuden säädöllä.

Kuvassa 4 on esitetty kenttätestijärjestelmää varten laadittu vaatimuslista, josta ilmenee vaatimukset osien suunnittelua varten. Vaatimuslistasta käy ilmi kenttätestijärjestelmälle asetetut kiinteät vaatimukset (KV), vähimmäisvaatimukset (VV) ja toivomukset (T).

Kenttätestijärjestelmän vaatimuslista	
	1. Geometria
KV	Yksinkertainen ja symmetrinen siipi
KV	Painetun elektronisen laitteen ja tarvittavan johdotuksen sovittaminen siipeen
VV	Savukoneen suutin yksinkertaisella kohtauskulman ja korkeuden säädöllä
KV	Ilmanopeusmittarin kiinnitysmekanismi yksinkertaisella kohtauskulman ja korkeuden säädöllä
	2. Materiaali
VV	Siipiprofiilien materiaali mahdollisimman kevyttä ja helposti leikattavaa
	3. Valmistus
T	Mahdollisimman monen osan valmistaminen OAMK:n tiloissa resurssien mukaan
	4. Asennus
VV	Kenttätestijärjestelmä helposti asennettavissa
	5. Testattavuus
VV	Kenttätestijärjestelmä helposti testattavissa
	6. Kunnossapito/Kokoonpantavuus
T	Kenttätestijärjestelmän osat helposti irroitettavissa ja huolettavissa

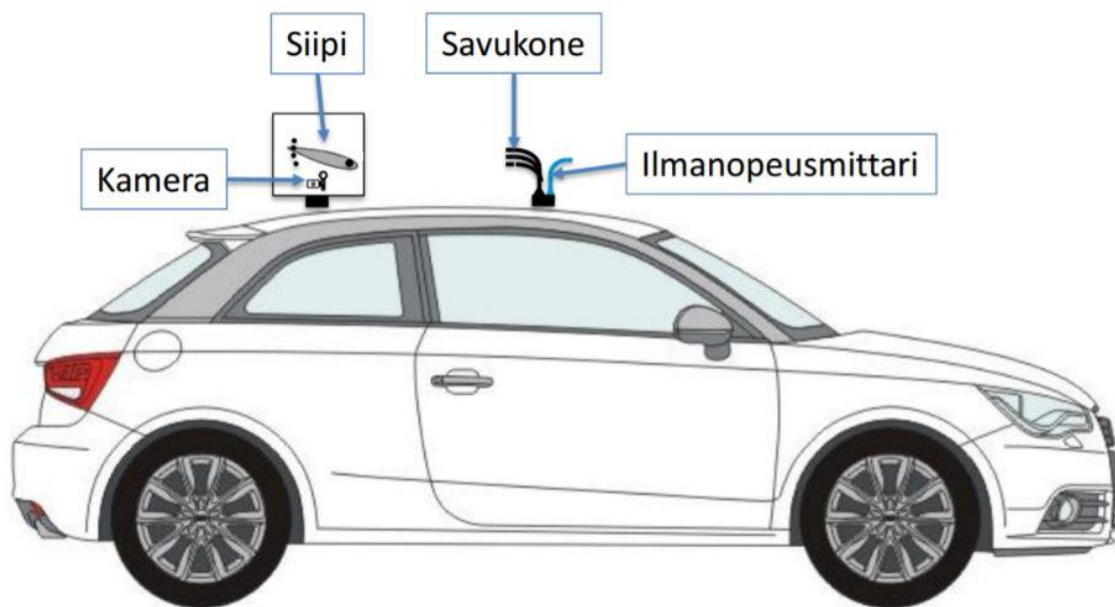
KUVA 4. Kenttätestijärjestelmälle laadittu vaatimuslista

4.2 Esisuunnittelu

Esisuunnittelu on systemaattisen suunnittelun toinen vaihe, joka sisältää tehtävän selkeän kuvailun, toimintorakenteen esittämisen, ratkaisun haun, ratkaisujen yhdistämisen, sopivien yhdisteiden valinnan, ratkaisujen konkretisoinnin ja yhdistelmien arvioinnin. (13.)

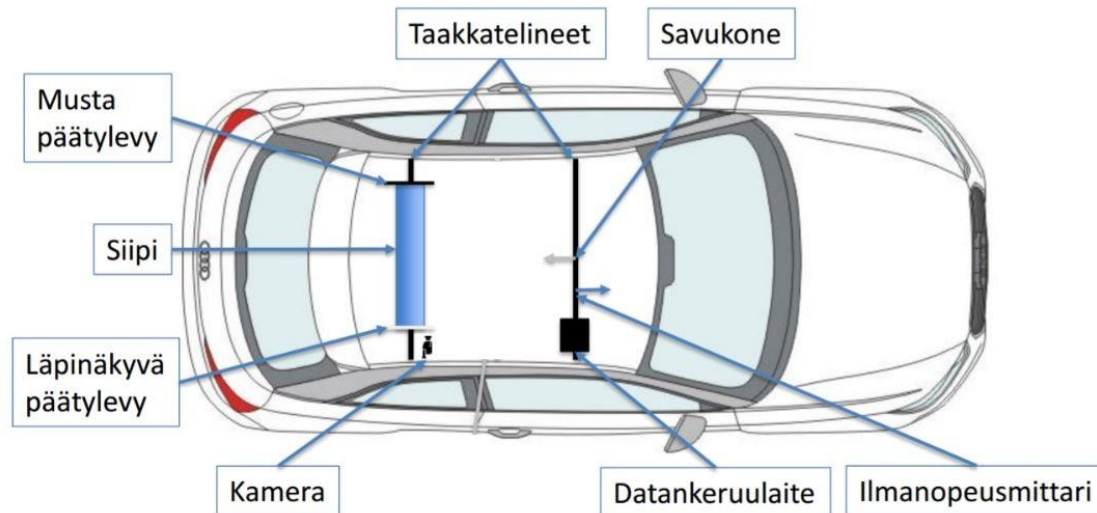
Esisuunnittelun ensimmäisessä vaiheessa pyritään muotoilemaan ja selkiyttämään tehtävänkuvaus mahdollisimman tarkasti. Esisuunnittelussa pyritäänkin siis kuvaamaan vain olennaista asiaa ja selvittämään tuotekehitystehtävän ydin. Lähtökohtana hyödynnetään vaatimuslistaa ja alustavaa tuotespesifikaatiota ja pyritään sanallisesti esittämään asiat käyttäen mahdollisimman johdattelema- tonta ja abstrakteja ilmaisuja. (13; 5, s. 82.)

Opinnäytetyön kannalta oleellista oli kuvata esisuunnitteluvaiheessa tuotekehityksen tarkoitus mahdollisimman selkeästi. Kuvassa 5 on esitetty opinnäytetyön alkuhahmotelma, jonka perusteella suunniteltiin kenttätestijärjestelmää vaatimuslistaa apuna käyttäen.



KUVA 5. Kenttätestijärjestelmän järjestely sivulta

Kuvassa 6 näkyy yksityiskohtaisemmin kenttätestijärjestelmän alkuhahmotelma. Savukone on sijoitettu keskelle taakkatelineitä ja sensorikalvo on tarkoitus sijoittaa siiven puoliväliin, jolloin savukone ja sensorikalvo ovat samassa linjassa.



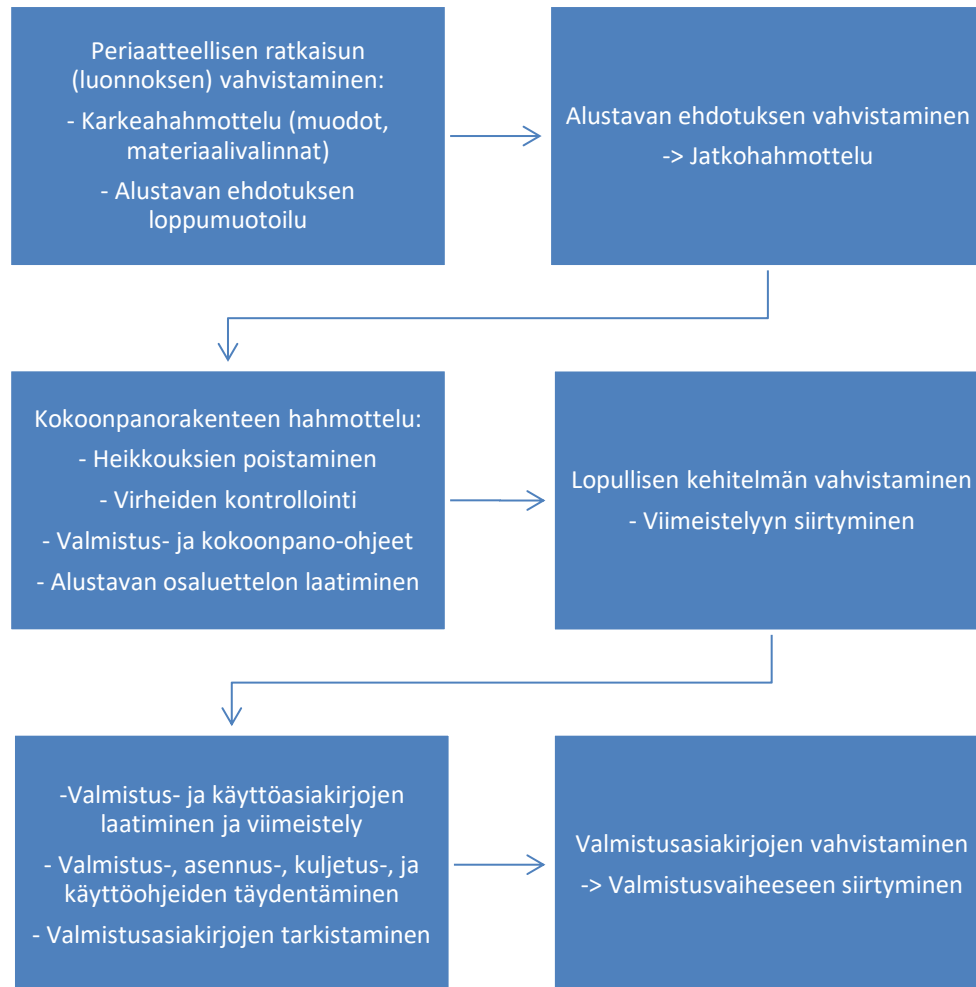
KUVA 6. Kenttätestijärjestelmän järjestely ylhäältä

Oleellisten ongelmien selkiyttämisessä ja muotoilussa käytetään apuna vaatimuslistan analysointia abstrahoimalla. Analyysin myötä vaatimuslistasta karsiutuvat pois vaiheittain toivomukset ja sellaiset vähimmäisvaatimukset, jotka eivät välittömästi liity tuotteen toimintaan. Abstrahoinnissa määrälliset vaatimukset muutetaan laadullisiksi sekä abstrahoinnin tulosta yleistetään ja laajennetaan mielekkäästi. Analyysin lopuksi muotoillaan ongelma tai tehtävä yleiseen muotoon ottamatta kantaa ratkaisuihin tai toteutukseen. (13.)

4.3 Yksityiskohtainen suunnittelu

Esisuunnitteluvaihe päättyy luonnosten ja hahmotelmien arvosteluun sekä lopuksi lupaavimman luonnoksen valintaan. Tämän jälkeen valitun luonnoksen yksityiskohtia suunnitellaan lopulliseksi tuotteeksi, ja mahdollisesti jopa markkinoitavaksi tuotteeksi. (10, s. 92.) Yksityiskohtaisessa suunnittelussa joudutaan usein tekemään rinnakkain tai peräkkäin useampia mittakaavaisia ehdotuksia, joiden avulla voidaan tutkia ja arvioida eri ehdotuksien ja muunnelmien etuja

sekä haittoja. Suunnitteluvaiheen lopuksi ne päätyvät teknis-taloudelliseen arvosteluun, jolloin saadaan uutta tietoa korkeammalla informaatiotasolla. (4, s. 49.) Yksityiskohtaisen suunnittelun vaiheet ovat esitetty kuvassa 7.



KUVA 7. Yksityiskohtaisen suunnittelun vaiheet (4, s. 51)

4.4 Prototyypin valmistus ja testaus

Prototyypivaihe sisältää prototyypin valmistuksen, testauksen, tulosten analysoinnin ja suunnitelmien tarkistuksen. Prototyyppiä voidaan hyödyntää tuotteen teknisten ja taloudellisten ominaisuuksien selvittämisessä tai esimerkiksi edullisempien valmistusmenetelmien löytämisessä. Prototyyppejä voidaan valmistaa minkä tahansa suunnitteluvaiheen aikana, jolloin suunnitteluprosessin työvaiheita ei tehdä täydellisesti, vaan niitä sovelletaan prototyypin testauksesta saa-

tujen tietojen pohjalta. Prototyyppejä voidaan testata myös isommissa tuotantomäärissä, jolloin testaus painottuu prototyypin kykyyn vastata massatuotannon tarpeita. (10, s. 102.)

Prototyypit jaetaan yleisesti neljään eri kategoriaan:

- proof-of-concept-prototyyppi
- proof-of-product-prototyyppi
- proof-of-process-prototyyppi
- proof-of-production-prototyyppi. (11, s. 117 - 118.)

Proof-of-concept-prototyyppi keskittyy tuotteen toiminnan kehittämiseen asiakkaan tai yrityksen omiin tarpeisiin nähden. Kyseinen prototyyppi valmistetaan usein oppimisvälineeksi, jolloin tarkka geometria, valmistusmateriaalit ja -prosessi eivät ole tärkeimmässä roolissa. (11, s. 118.)

Proof-of-product-prototyyppiä kehitetään auttamaan tuotteen komponenttien ja kokoonpanojen hienosäätöä. Nykypäivänä pystytään nopeasti valmistamaan prototyyppejä pelkästä CAD-tiedostosta, mikä on parantanut huomattavasti proof-of-product-prototyyppien valmistusaikaa ja kustannustehokkuutta. (11, s. 118.)

Proof-of-process-prototyyppiä käytetään sekä geometrian että valmistusprosessin tarkistamiseen. Kyseisen prototyypin valmistukseen käytetään tarkkaan mietittyjä materiaaleja ja valmistusprosesseja, jolloin saadaan tuotteesta näytteitä toiminnallisia testauksia varten. Proof-of-production-prototyypin avulla todennetaan koko tuotantoprosessi ja sen toimivuus ennen massatuotannon aloittamista. (11, s. 118.)

Tässä opinnäytetyössä ei valmistettu prototyyppiä. Prototyyppi korvattiin tehdyillä simuloinneilla, joista saatiin tärkeää ja havainnollistavaa tietoa. Saatuja tietoja voidaan hyödyntää käytännön testien yhteydessä tulevaisuudessa. Simulointien tulokset ovat esitetty kappaleessa 6.

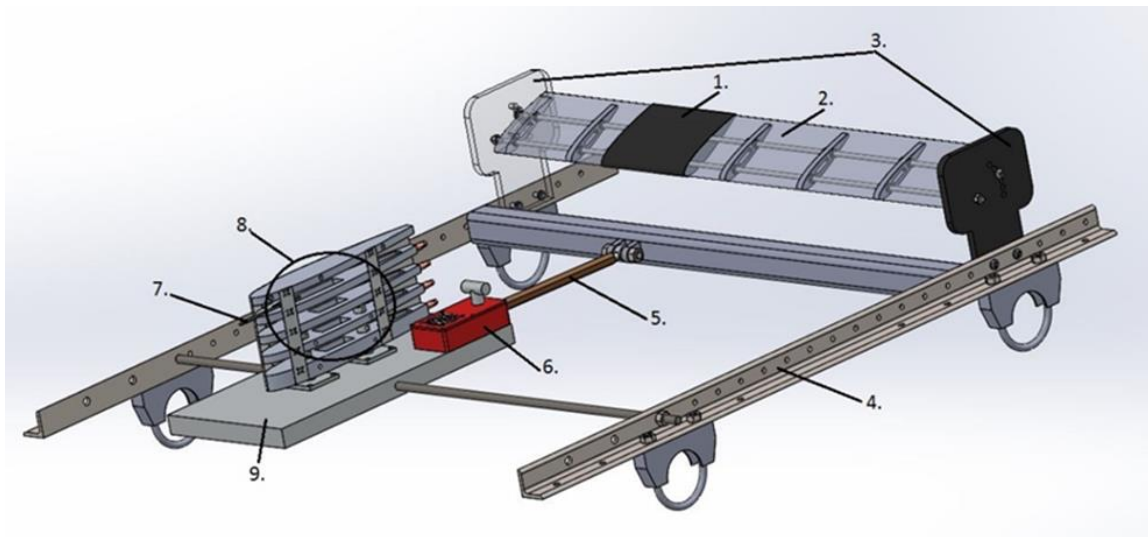
4.5 Tuotannon käynnistäminen

Prototyyppien ohella voidaan tehdä nollasarja, jonka suunnittelun ja valmistuksen tarkoituksena on tutkia ja testata niitä valmistusmenetelmiä, joilla tuote on sarjavalmistteisesti tarkoitus tehdä. Nollasarjan avulla saadaan myös tietoa tuotteen valmistuskustannuksista ja teknisistä ominaisuuksista prototyypin tavoin. Nollasarjojen kappalemäärät vaihtelevat muutamista kappaleista muutamiin saataan kappaleisiin tuotteen yksikköhinnan mukaisesti. (10, s. 102.)

Tuotekehitys ei kuitenkaan pääty tuotannon alkamiseen, vaan kehitys jatkuu tiiviisti tuotannon ohella, sillä tuotannon yhteydessä saadaan yleensä kokemustietoa tuotteen mahdollisista käyttöhäiriöistä ja asiakkaiden palautteista. Näillä tiedoilla tuotekehitystä voidaan siis edelleen jatkaa ja tietoja voidaan hyödyntää myös muita tuotekehitysprojekteja toteuttaessa. (10, s. 102.) Tuotannon käynnistämisen vaihe rajattiin pois tästä opinnäytetyöstä, koska ajallisesti vaihe olisi ajoittunut useiden kuukausien päähän.

5 KENTTÄTESTIJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA VALMISTUS

Kenttätestijärjestelmän suunniteltavia ja mallinnettavia osia olivat takasiipi, päätylevyt ja etusiipi. Kuvassa 8 on esitetty kenttätestijärjestelmä kokonaisuudessaan, sisältäen kenttätestijärjestelmän rakenteelliset osat ja muut kenttätestijärjestelmän toiminnan kannalta olennaisimmat osat. Opinnäytetyön liitteenä on piirustuskuva kenttätestijärjestelmän kokoonpanosta.



KUVA 8. Kenttätestijärjestelmä

Kenttätestijärjestelmän osat kuvassa 8 ovat

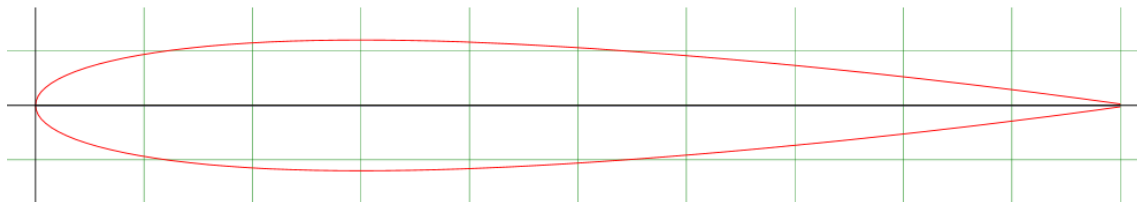
1. sensorikalvo
2. takasiipi
3. päätylevyt
4. kulmarautakisko
5. raidetanko
6. savukone
7. pitot-putki
8. etusiipi
9. etusiiven tukialusta.

5.1 Takasiipi

5.1.1 NACA-profiili

NACA-profiilit ovat peräisin Yhdysvalloista. NACA eli National Advisory Committee for Aeronautics oli Yhdysvaltain valtion virasto, joka tunnettiin myös NASA:n edeltäjänä. NACA suoritti lukuisia tutkimus- ja kehityshankkeita, joita olivat muun muassa ilmanottoaukkoteknologia moderniin autoteollisuuteen ja siipiprofiilimallit lentoteollisuuteen. NACA-profiileja käytetään edelleen hitaissa lentokoneissa ja nopeiden koneiden vakaimissa. NACA-profiilit suunniteltiin 1920- ja 1930-luvuilla NACA:n Langleyn tutkimuskeskuksessa sekä teoreettisin että kokeellisin menetelmin. (6, s. 96.)

Opinnäytetyöhön valittiin NACA 0012 -profiili, koska se on symmetrinen ja sen ulkomuoto vastasi hyvin niitä hahmotelmia, jotka tehtiin esisuunnitteluvaiheessa (kuva 9). NACA 0012 -profiili on niin sanottu 4-sarjan profiili, mille on tyypillistä vastuksen kasvaminen rauhallisesti nostovoimakertoimen kasvaessa. (6, s. 97.)



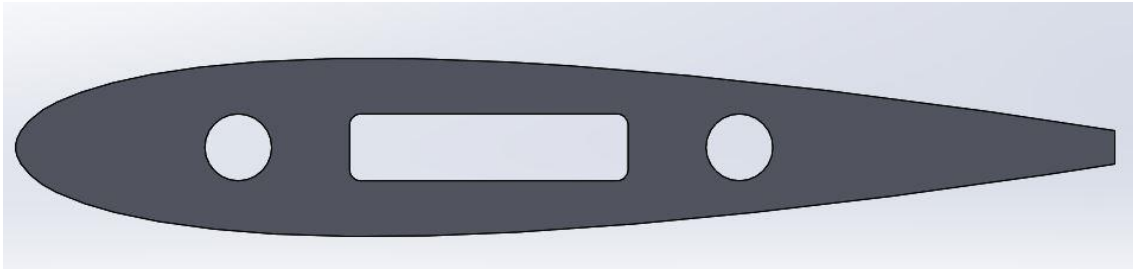
KUVA 9. NACA 0012 -profiili (16)

NACA:n nelinumeroiset siipiosat määrittävät profiilin geometrian. Kyseinen NACA 0012 -profiilimalli on symmetrinen, koska luku 00 osoittaa, ettei siinä ole kallistusta. Luku 12 osoittaa, että profiililla on 12 % paksuus-pituussuhde. Se on siis 12 % paksuudeltaan pituuden mitasta. (6, s. 97.)

5.1.2 Suunnittelu

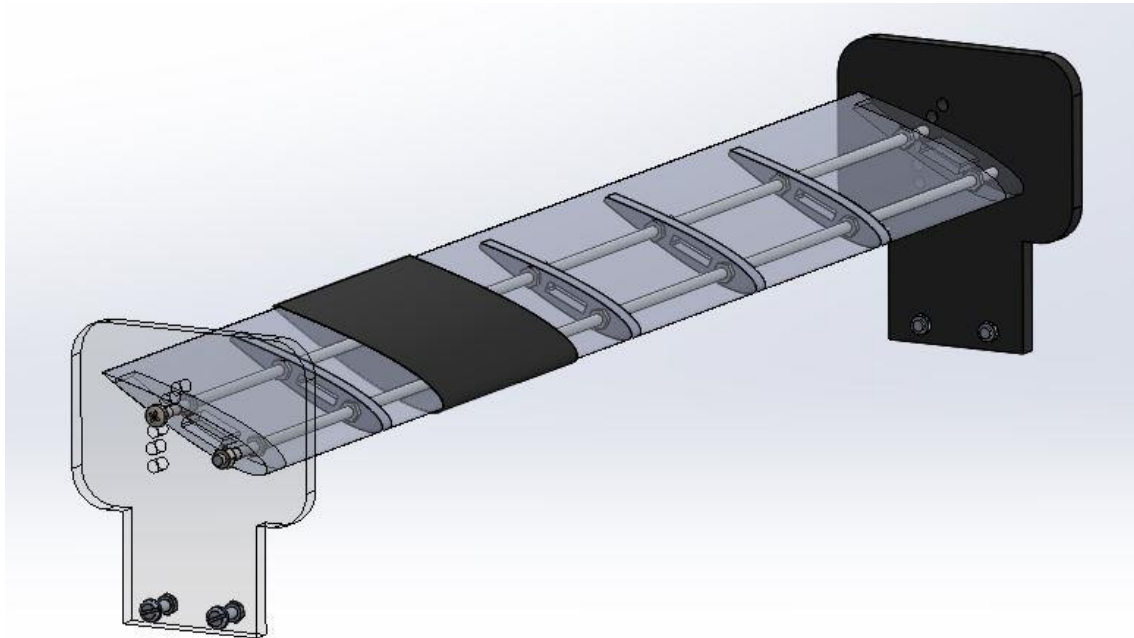
Takasiiven siipiprofiilimallin valinnan tavoitteena oli löytää valmistuksen kannalta mahdollisimman yksinkertainen ja muodoltaan symmetrinen siipiprofiilimalli. Siipiprofiiliin keskelle mallinnettiin suorakulmion muotoinen kevennys, jolla

saatiin siipiprofiilia kevennettyä (kuva 10). Takasiiven suunnittelussa hyödynnettiin lentokoneiden siipirakennemenetelmää, jossa siipeä ei valmisteta kiinteäksi rakenteeksi, vaan siiven muoto mallinnetaan halutun siipiprofiilimallin mukaan.



KUVA 10. NACA 0012 -siipiprofiilin mukainen mallinnus

Takasiivessä on seitsemän siipiprofiilia päätylevyjen välissä ja niiden välit mitoitettiin vastaamaan A5-arkin leveyttä. Leveydeltään A5-arkin levyinen sensorikalvo kiinnitettiin siipiprofiilien ympärille. Siipiprofiilien piiri on niin ikään mitoitettu vastaamaan A5-arkkia. Siipiprofiileihin mallinnettiin keskelle kevennykset, joilla saadaan koko takasiiven rakennetta kevyemmäksi. Siipiprofiilien paksuudeksi määriteltiin 10 mm uloimpia siipiprofiileja lukuun ottamatta. Uloimpien siipiprofiilien paksuudeksi määriteltiin 20 mm, jotta ulkopinnoille voidaan koneistaa M6-kierteet. M6-kierteet mahdollistavat kulmaltaan säädettävän takasiiven, jonka kulmaa pystytään säätämään päätylevyjen ulkopuolelta. Takasiiven kulman säädettävyys oli yksi kenttätestijärjestelmälle asetetuista vaatimuksista (kuva 11).

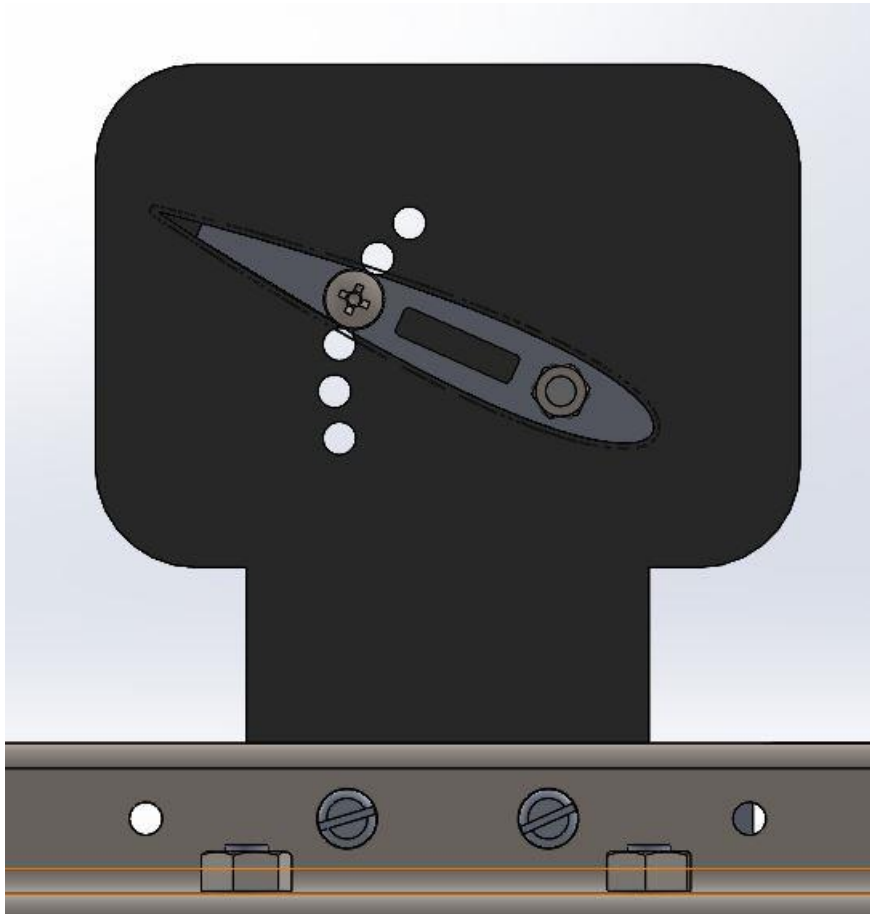


KUVA 11. Takasiipi

Vaatimuksia siipiprofiilien materiaalivalinnalle ei ollut kovin paljon. Siipiprofiilien materiaaliksi valittiin polyuretaani, koska se on riittävän kestävä ja helposti työstettävä materiaali. Tämän lisäksi kyseistä materiaalia oli tarpeeksi saatavilla ja tarvittavat osat saatiin leikattua samasta aihioista. Siipiprofiilit leikattiin vesileikkurilla, koska leikkausjäljestä haluttiin hyvä ja leikkaustavasta nopea. Siipiprofiilit ovat myös paksuudeltaan saman paksuisia, joten vesileikkaaminen onnistuu nopeasti samasta aihioista samalla leikkauskerralla.

5.2 Päätylevy

Takasiiven molempiin päihin mallinnettiin päätylevyt, joihin puolestaan mallinnettiin takasiiven kulmalle portaittainen säätömahdollisuus. Kulma-asteikko portastettiin 12 asteen välein jättäen yhden kulman säätövariaation vaakatason alapuolelle (kuva 12). Takasiipi voidaan vakauttaa ja kiristää haluttuun kulmaan päätylevyn reiästä ruuvilla, joka kiinnittyy takasiiven uloimpaan siipiprofiiliin M6-kierteeseen. Portaittaista kulman säätömahdollisuutta voidaan hyödyntää monipuolisten testausten käyttöön, jolloin saadaan laajaa dataa siitä, miten takasiiven eri kohtauskulma vaikuttaa ilmanvirtaukseen.



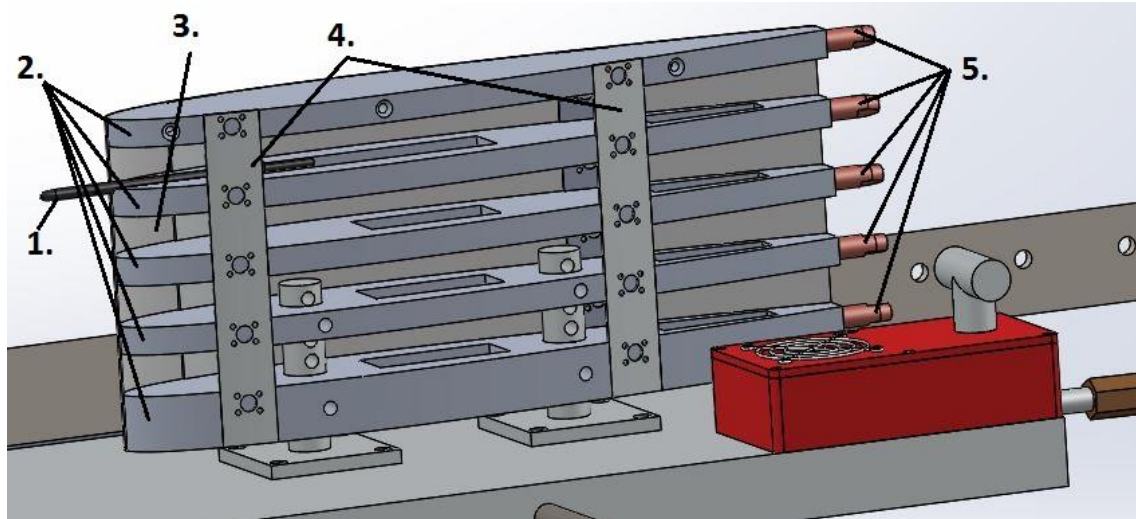
KUVA 12. Päätylevy

Ensimmäinen päätylevy valmistettiin samasta polyuretaanilevystä kuin siipiprofiilitkin. Toinen päätylevyistä valmistettiin läpinäkyvästä polykarbonaatista, jotta ilman virtauspyörteilyä olisi mahdollista kuvata testausten aikana kameralla takasiiven sivulla.

5.3 Etusiipi

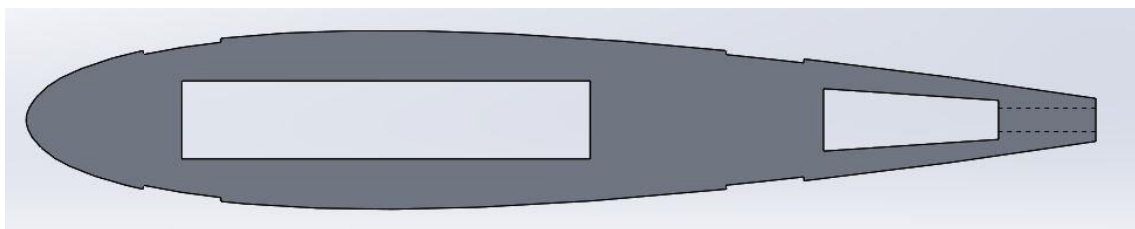
Opinnäytetyön yhtenä tavoitteena ja tehtävänä oli suunnitella ratkaisu savukoneen ja ilmanopeusmittarin integroimiselle kenttätestijärjestelmään. Ratkaisuna suunniteltiin etusiipi, jonka tarkoituksena oli toimia savukoneen savun ulostulona ja ilmanopeusmittarin kiinnitysalustana. Savukoneeseen kiinnitettiin muoviletku, joka vie savun etusiipirakenteeseen. Etusiiven rakenne koostui viidestä siipiprofiilista, jotka päällystettiin ohuella alumiinilevyllä. Etusiiven siipiprofiileina käytettiin myös NACA 0012 -profiilia, mutta isompana.

Siipiprofiilit kiinnitettiin toisiinsa reikänauhojen avulla. Siipiprofiilit päällystettiin alumiinilevyllä, jotta etusiipi saatiin aerodynaamiseksi. Alumiinilevyn sijaan voisi käyttää myös esimerkiksi ohutta vanerilevyä. Siipiprofiilien takaosaan suunniteltiin viisi ulostuloa savulle. Ulostulot olivat M6-kierre-reikiä, joihin kiinnitetään MIG-suuttimet, jotta savuvana saatiin kohdistettua mahdollisimman suoraviivaisesti kohti takasiipeä. Etusiiven rakenne on esitetty kuvassa 13.



KUVA 13. Etusiiven rakenne alumiinikuoren alta. 1. pitot-putki, 2. siipiprofiilit, 3. alumiinikuori, 4. reikänauha, 5. MIG-suuttimet

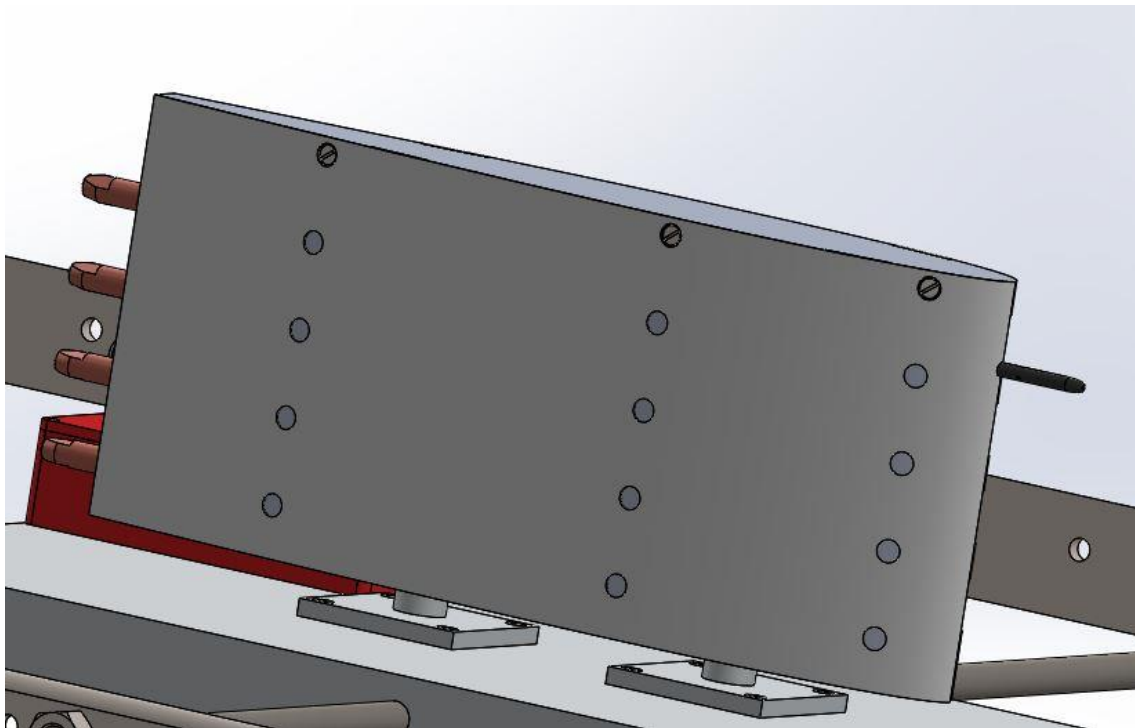
Etusiiven mallinnuksessa hyödynnettiin samaa siipiprofiilimallia kuin takasiiven mallinnuksessa (kuva 14), jotta etusiiven muoto saatiin säilytettyä aerodynaamisena ja takasiiven ympärillä savun häiriöpyörteily minimaalisena. Etusiiven sisälle mallinnettiin myös paikka ilmanopeusmittarille.



KUVA 14. Etusiiven rakenteessa käytetty NACA 0012 -siipiprofiilimalli

Etusiiven suunnittelun vaatimuksena oli pystyä muuttamaan sen kulmaa ja korkeutta, jotta savukoneen savu saadaan kohdistettua takasiipeen ja sensorikalvoon mahdollisimman tarkasti ja halutusta kulmasta. Kulman ja korkeuden säätömekanismit mallinnettiin mahdollisimman yksinkertaisiksi, jotta niiden käyttö testien aikana sujuisi ongelmitta. Pitämällä mekanismit mahdollisimman yksinkertaisina mahdollistettiin myös se, että kenttätestijärjestelmän asennettavuus ja valmistettavuus säilyivät yksinkertaisina.

Etusiiven korkeuden säätömekanismi on yksinkertainen, vertikaalisesti portaittain oleva säätömekanismi. Etusiiven alustaan mallinnettiin pystytangot, joihin porattiin 5 mm:n reiät 7,5 mm:n välein. Etusiiven ulkopinnalla on vastaavanlainen reikä. Haluttu etusiiven korkeus saadaan valittua ruuvaamalla ruuvi reikien läpi. Siipiprofiilit päällystettiin alumiinilevyllä, jotta etusiipi saatiin aerodynaamiseksi (kuva 15). Alumiinilevyn sijaan voisi käyttää myös esimerkiksi ohutta vanerilevyä. Alumiinilevy kiinnitettiin etusiiven siipiprofiileihin ruuveilla.

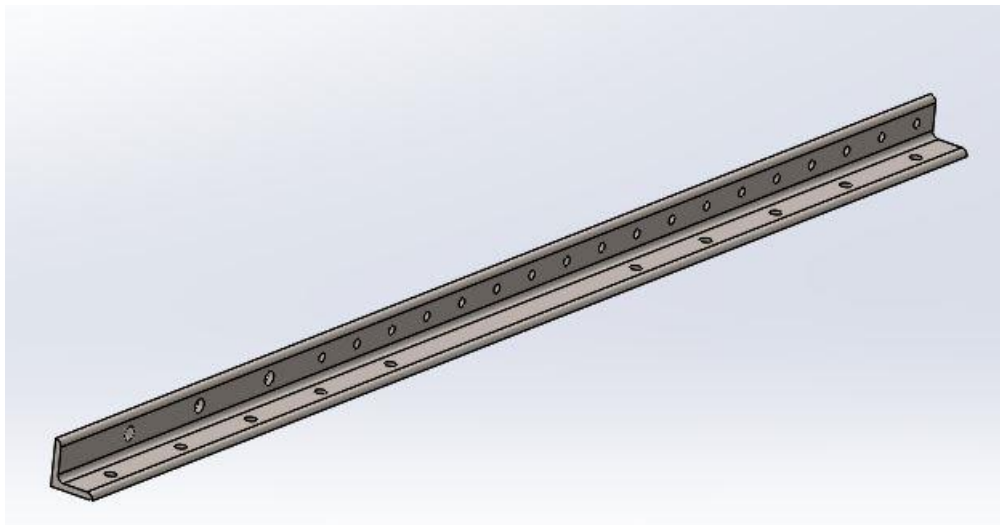


KUVA 15. Etusiiven alumiinilevy kuorimateriaalina

5.4 Muut kenttätestijärjestelmässä käytetyt komponentit

5.4.1 Kulmarautakisko

Kenttätestijärjestelmä kiinnitettiin auton taakkatelineisiin kiinnityskiskoilla. Kiskon muodoksi valikoitui kulmarautaprofiili (kuva 16), sillä se mahdollisti helpon ja tukevan kiinnityksen. Kulmarautakiskon käyttö mahdollisti myös päätylevyjen helpon ja säädettävän kiinnityksen. Kulmarautakiskoon mallinnettiin reikiä tasaisin välein, jotta päätylevyjen ja niiden välissä olevaa takasiiven paikkaa voidaan halutessa vaihtaa. Taakkatelineiden kiinnityspaikkaa voidaan myös säätää kiinnityskiskojen pituussuunnassa, jotta kenttätestijärjestelmä saadaan kohdistettua haluttuun paikkaan.

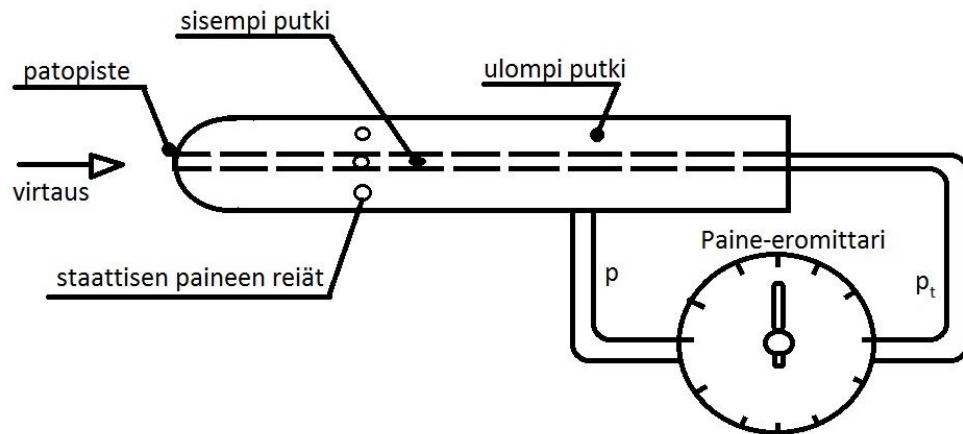


KUVA 16. Kulmarautakisko

5.4.2 Ilmanopeusmittari

Ilmanopeusmittarina käytetään pitot-putkea. Pitot-putki muodostuu kahdesta sisäkkäisestä putkesta, joista sisempi putki on avoinna suoraan kohti virtauksen tulosuuntaa ja ulompi putki on edestä suljettu (kuva 17). Sisemmän putken suuaukolla on patopiste, jossa virtaus pysähtyy. Sisemmän putken sisällä vallitsee kokonaispaine p_t . Ulomman putken ulkopintaan on tehty reikiä tietyn matkan

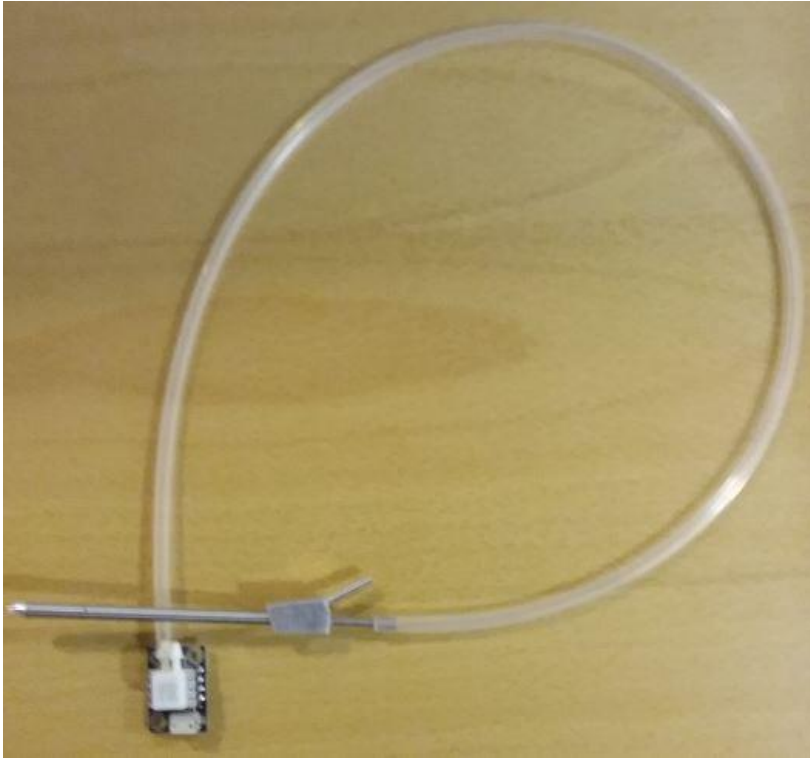
päähän putken suusta, jotta siinä saadaan vallitsemaan sama paine kuin häiriöttömässä virtauksessa kaukana kappaleesta eli kyse on tällöin ilmanpaineesta. (1, s. 19 - 20.)



KUVA 17. Pitot-putken toimintaperiaate (6, s. 20)

Yhdistämällä paineiden erotusta mittaavaan anturiin voidaan kokonaispaineen ja staattisen paineen erotuksen avulla määrittää ja laskea tarkka nopeus. Putken akselin tulee olla riittävän tarkasti virtauksen suuntainen, jotta pitot-putken antama tarkkuus olisi riittävä. Mikäli putken akselin suunta eroaa virtauksen suunnasta vähemmän kuin 5° , virhe on pienempi kuin 1 % kineettisestä paineesta. Staattista painetta voidaan mitata myös yksinkertaisella pitot-putkella, jonka suu on virtausta vastaan ja putken akseli likimain virtauksen suuntainen. (6, s. 19 - 20.)

Kenttätestijärjestelmässä pitot-putkea (kuva 18) käytetään sensorikalvon mitausten yhteydessä, jotta saadaan tarkka nopeusarvo autolle. Auton nopeusmittariakin voisi käyttää nopeuden mittaamisessa, mutta tällä menetelmällä saadaan tarkemmat nopeusarvot.



KUVA 18. Pitot-putki

5.4.3 Savukone

Savukone on laite, joka tuottaa savunomaista tiheää höyryä. Keinotekoista savua käytetään yleisimmin ammattimaisissa viihdeohjelmissa, mutta pienemmät ja edullisemmat savukoneet ovat yleistyneet vuosien kuluessa myös ihmisten yksityiskäyttöön. Tyypillisesti savu syntyy höyrystämällä vettä ja glykolipohjaisia tai glyseriinipohjaisia nesteitä. Neste höyrystyy koneen sisällä, minkä jälkeen se vapautetaan savukoneesta ulos. Höyrystynyt neste sekoittuu viileämmän ulkoilman kanssa, jolloin höyry tiivistyy ja saa sen näyttämään paksulta savulta.

Kenttätestijärjestelmässä savukonetta (kuva 19) käytetään havainnollistamaan ilmanpyörteilyn käyttäytymistä takasiiven ympärillä. Toinen päätylevyistä valmistettiin läpinäkyvästä materiaalista, jotta kameralla pystytään kuvaamaan ilmanpyörteilyn käyttäytymistä takasiiven ympärillä myös tilanteissa, joissa kamera joudutaan asentamaan päätylevyn ulkosivulle.



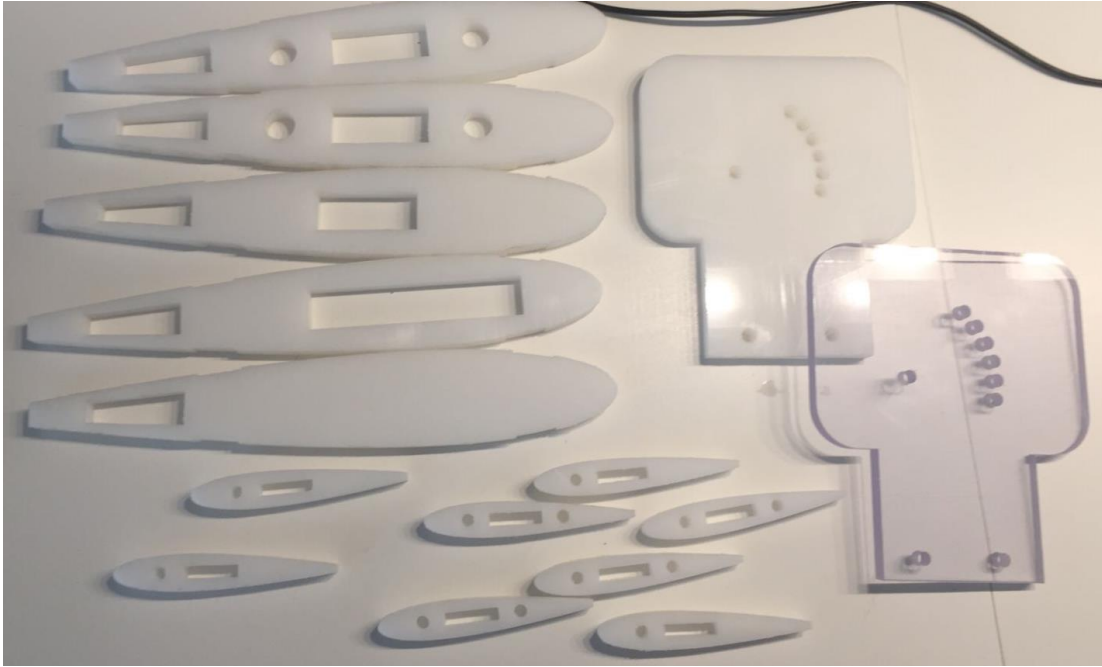
KUVA 19. RC Model Smoke Generator 12V Duel Outlet

5.4.4 Raidetanko

Raidetankoa käytetään etusiiven kulman säätämiseen (kuva 20). Raidetangon toinen pää kiinnitetään etusiiven alustassa oleviin korvakkoihin ja toinen pää takasiiven edessä olevaan neliöputkeen korvakkoihin. Riippuen pyörityssuunnasta raidetangon pituus joko kasvaa tai lyhenee, koska sen päissä on vastakkaisuuntaiset kierteet. Raidetangon pituuden kasvaminen tai lyheneminen saa etusiiven kulman muuttumaan.



KUVA 20. Raidetanko



KUVA 22. Vesileikkurilla valmistetut siipiprofiilit ja päätylevyt

6 KENTTÄTESTIJÄRJESTELMÄN TESTAUS

6.1 Simulointi

Kenttätestijärjestelmälle suoritettiin SolidWorks-ohjelman Flow Simulation -työkalun avulla virtausanalyysi. Virtausanalyysin tuloksia on tarkoitus käyttää vertailussa käytännön testeistä saatujen tuloksien kanssa lähitulevaisuudessa. Flow Simulation -työkalun avulla pystyy tutkimaan ja simuloimaan ilma- ja nestevirtauksia erilaisissa kappaleissa ja niiden välillä. Simulointia varten 3D-mallia yksinkertaistettiin paljon poistamalla kaikki ruuvit, mutterit ja komponentit, jotka eivät ole olennaisia tässä virtausanalyysissä. Simulointia varten malliin jätettiin vain takasiipi ja etusiipi, jotta Flow Simulationin laskentatyökalut pystyvät laskemaan analyysin ylikuormittumatta. Kummankin simuloinnin tarkoitus oli tutkia, miten ilmanpyörteily käyttäytyy takasiiven ympärillä ja minkälainen paineja-kauma takasiivelle syntyy. Flow Simulation -työkalu tarvitsee simuloidakseen erilaisia parametreja, jotka määritellään simulointiprosessin alkuvaiheessa (kuva 23).



KUVA 23. Flow Simulation -prosessin työvaiheet

6.2 Simuloinnin tulokset

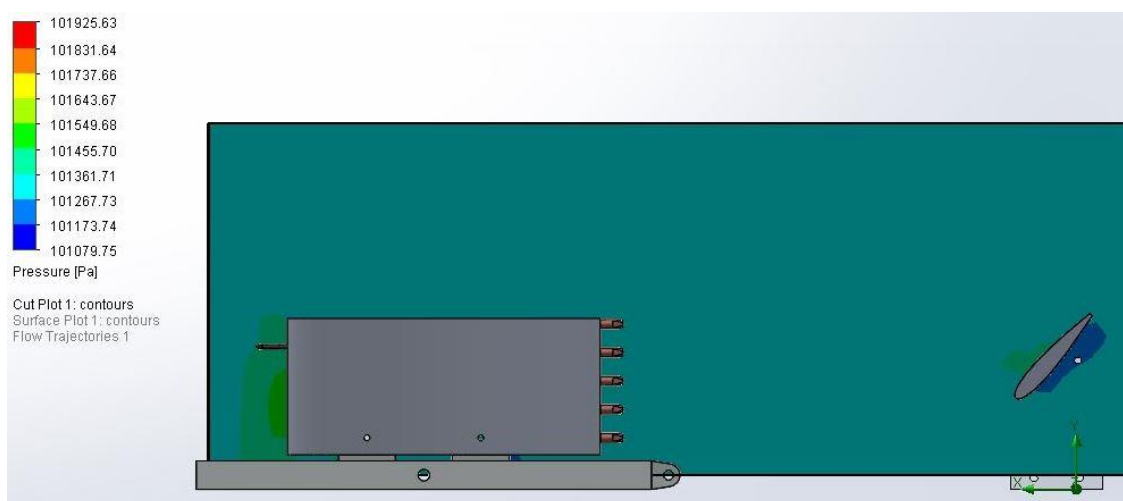
6.2.1 Ensimmäinen simulointi

Ensimmäinen simulointi suoritettiin testinopeudella 50 km/h. Simulointia varten takasiiven kulma muutettiin maksimijyrkkyyteen. Päätylevyn asteikkoreiät ovat 12°:n välein, eli maksimijyrkkyys takasiiven säädölle oli 48°. Taulukossa 1 on esitetty ensimmäistä simulointia varten tehdyt parametrimäärittelyt.

TAULUKKO 1. Ympäröivät parametrit ensimmäiselle simuloinnille

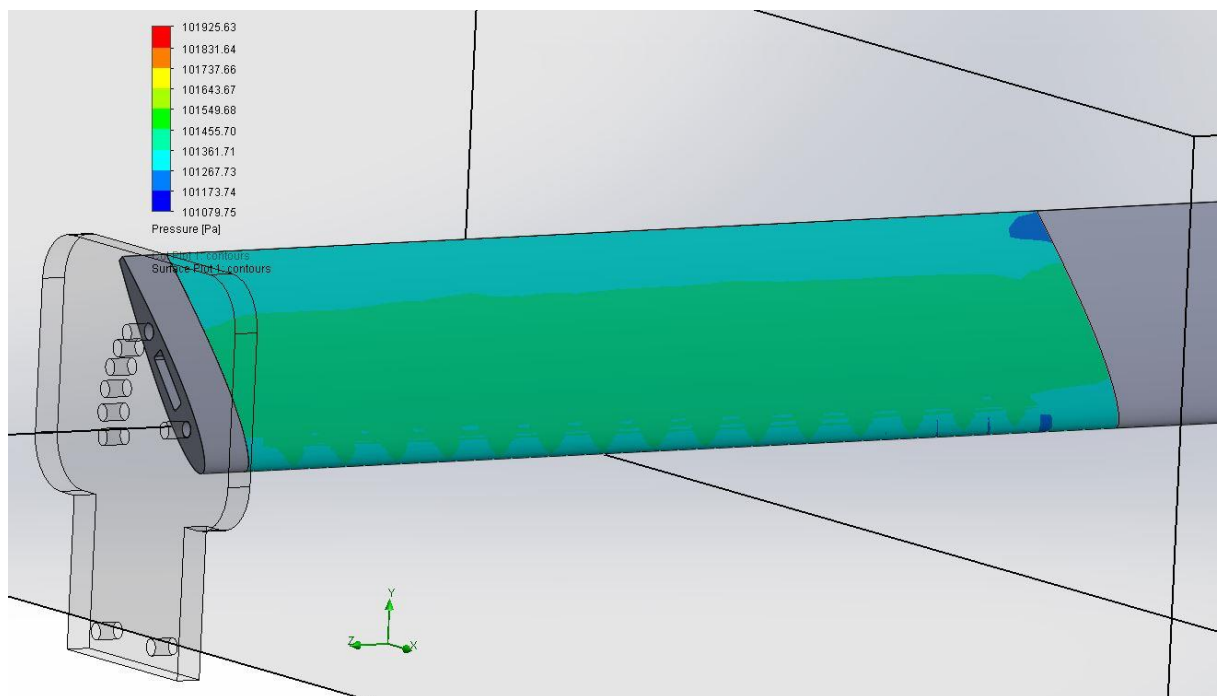
Termodynaamiset parametrit	<p>Staattinen paine: 101 325 Pa</p> <p>Lämpötila: 20 °C</p>
Nopeusparametrit	<p>Nopeus X-suunnassa: 13.9 m/s (50 km/h)</p> <p>Nopeus Y-suunnassa: 0 m/s</p> <p>Nopeus Z-suunnassa: 0 m/s</p>

Simuloinnissa tehtiin kolme eri tulosten tarkastelukuvaa. Cut plot -toiminto näyttää valittujen parametrien perusteella painejakauman valitulla X, Y tai Z-tasolla. Kuvassa 24 näkyy ilmanpaineen arvot poikkileikkauksena kenttätestijärjestelmään päin. Kuvasta näkyy selvästi, että takasiiven alapuolelle on kehittynyt alipainetta, mikä johtuu takasiiven jyrkästä kulmasta. Samalla takasiiven yläpuolelle on kehittynyt ylipainetta.



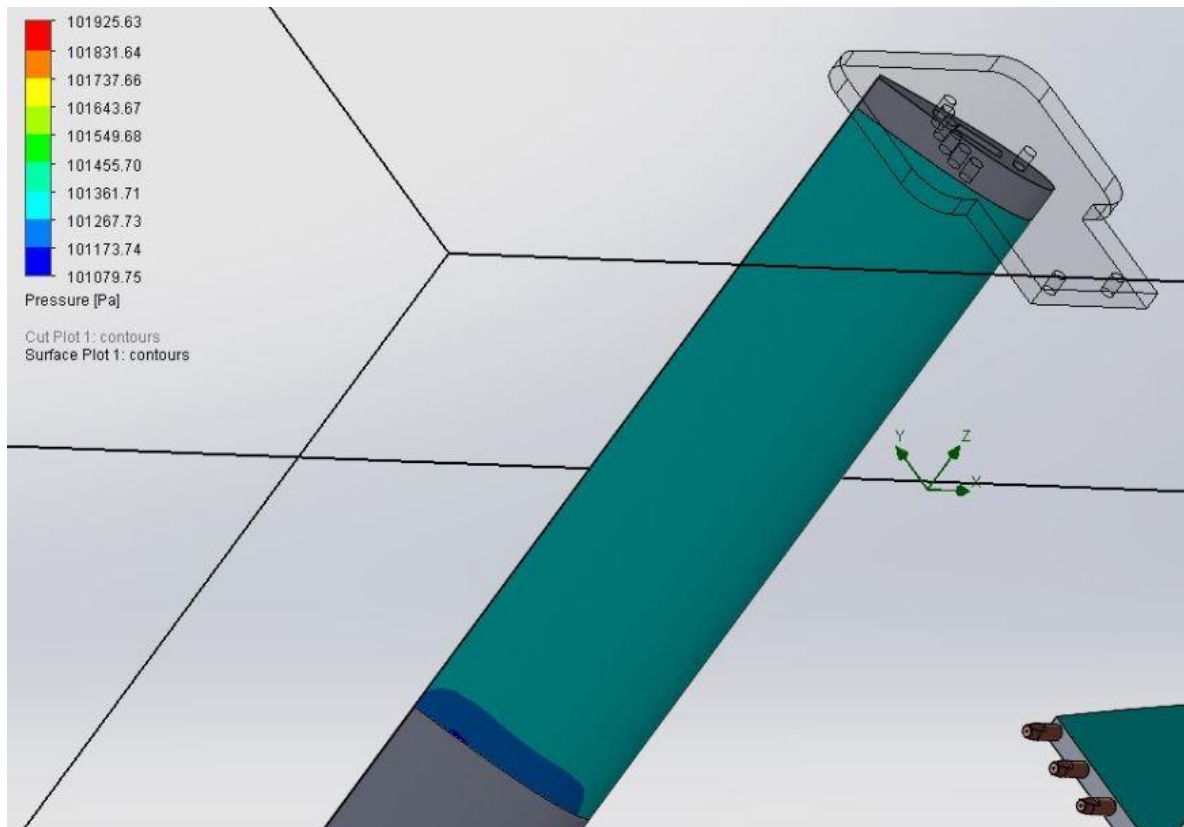
KUVA 24. Ilmanpaineen jakauma kenttätestijärjestelmässä

Cut plot -tarkastelutoiminnon jälkeen kenttätestijärjestelmälle tehtiin Surface plot -toiminnon kanssa pintojen painejakaumasimulointi (kuva 25). Kuvasta nähdään, että takasiiven yläpuolelle kohdistuu isoin paine.



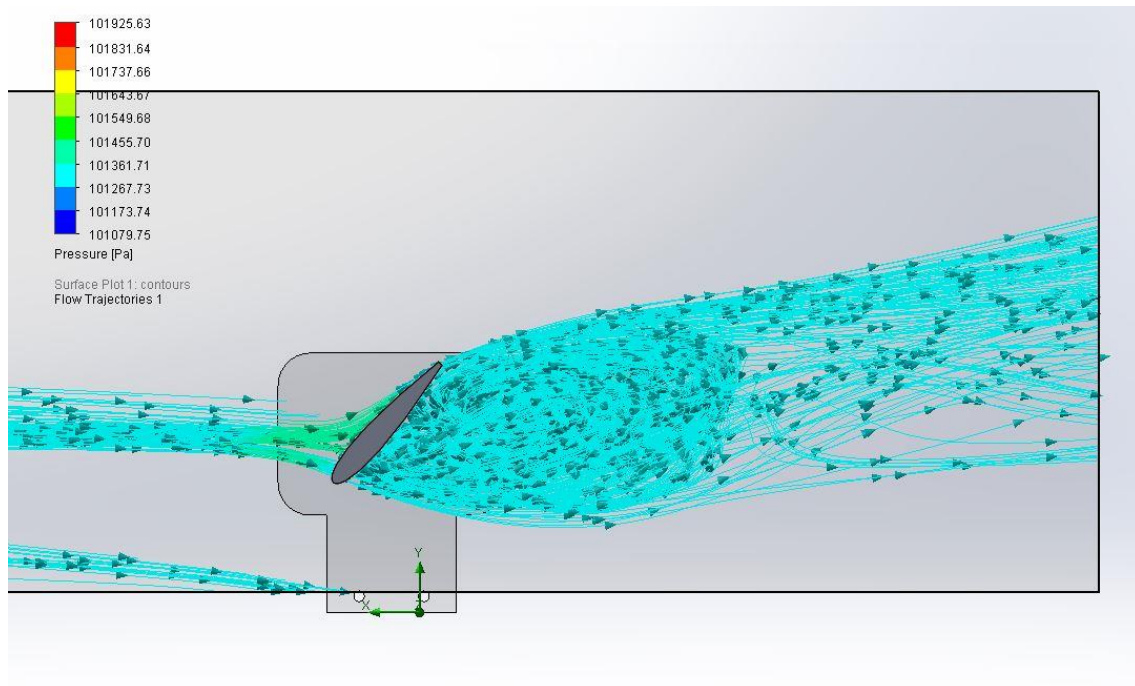
KUVA 25. Takasiiven yläpinnan painejakauma

Kuvassa 26 näkyy takasiiven alapinnan painejakauma. Takasiiven jyrkkä kulma aiheuttaa takasiiven alapuolelle pienimmän paineen.



KUVA 26. Takasiiven alapinnan painejakauma

Flow Trajectories -toiminto tutkii 3D-kuvana virtausreitin kulkua. Se antaa erittäin hyvän ja selkeän 3D-kuvan ilmanvirtauksen käyttäytymisestä kenttätestijärjestelmässä. Kuvasta 27 nähdään, miten takasiiven jyrkkä kulma saa aikaan ilmanpyörteilyä takasiiven alapuolelle. Ilmanvirtaus on virtaussuunnassa laminaarista ennen osumista takasiipeen. Jyrkkä kulma kuitenkin muuttaa laminaarisen ilmanvirtauksen turbulenttiseksi virtaukseksi, vaikka nopeus on maltillinen.



KUVA 27. Ilmanvirtauksen käyttäytyminen kenttätestijärjestelmässä

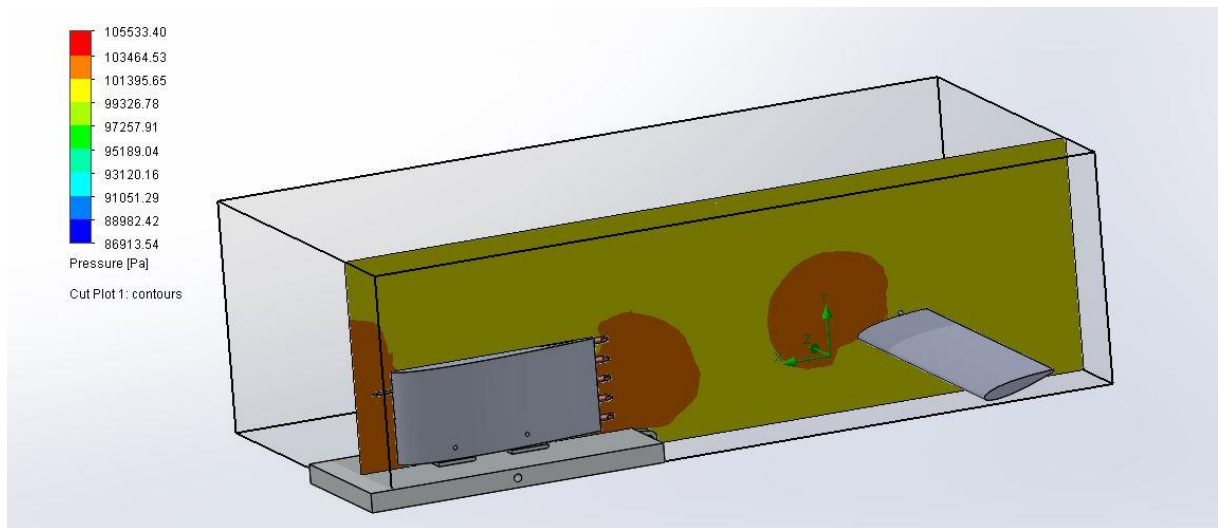
6.2.2 Toinen simulointi

Toinen simulointi suoritettiin testinopeudella 200 km/h. Simulointia varten taka-siiven kulma muutettiin 12°:seen. Toinen simulointi suoritettiin samalla periaatteella kuin ensimmäinenkin. Taulukossa 2 on esitetty toista simulointia varten tehdyt parametrinmääritykset.

TAULUKKO 2. Ympäröivät parametrit toiselle simulointikerralle

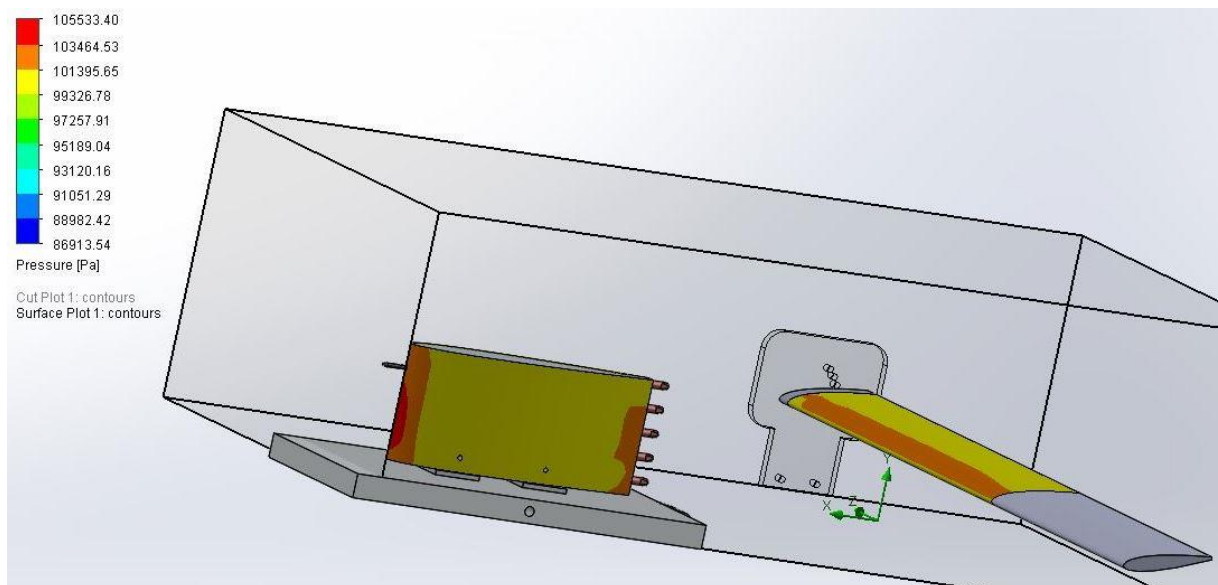
Termodynaamiset parametrit	Staattinen paine: 101 325 Pa Lämpötila: 20 °C
Nopeusparametrit	Nopeus X-suunnassa: 55.56 m/s (200 km/h) Nopeus Y-suunnassa: 0 m/s Nopeus Z-suunnassa: 0 m/s

Ilmanpaineen vaihtelut sijoittuvat etusiiven molempiin päihin ja takasiiven etupuolelle (kuva 28.)



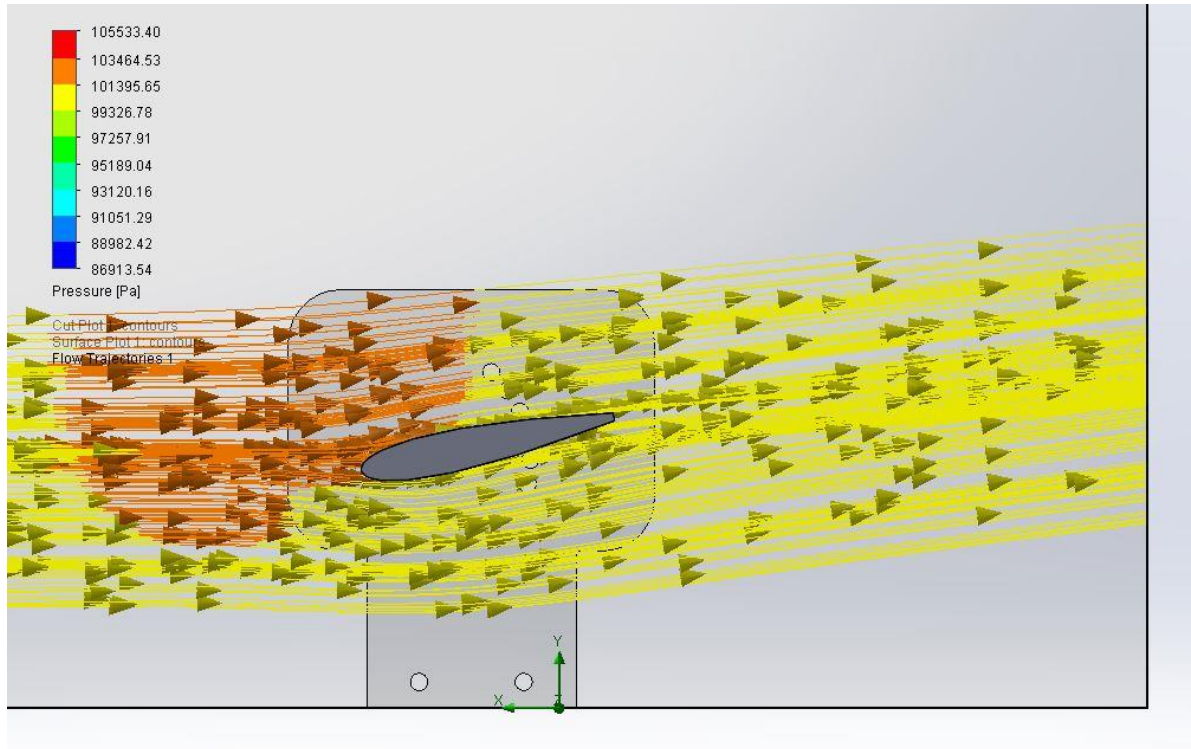
KUVA 28. Ilmanpaineen jakauma kenttätestijärjestelmässä, loiva takasiiven kulma

Suurin paine takasiivessä kohdistuu ensimmäisen simulointikerran tapaan sen yläpuolelle, lähelle siiven kärkeä (kuva 29).



KUVA 29. Etusiiven ja takasiiven pintojen painejakauma, loiva kulma

Kuvasta 30 nähdään, että virtaus pysyy melko laminaarisena takasiiven ympärillä, vaikka nopeutta on 200 km/h. Kuvan perusteella on vaikea todeta, missä sakkauspiste sijaitsee.



KUVA 30. Ilmanvirtauksen käyttäytyminen takasiiven ympärillä, loiva kulma

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä suunniteltiin aerodynaaminen kenttätestijärjestelmä, jonka avulla on tarkoitus tulevaisuudessa testata Oulun ammattikorkeakoulun PrinLa-bissa valmistettua sensorikalvoa. Työn tilaajana toimi Haltian Oy.

Opinnäytetyöksi asetettiin kenttätestijärjestelmän valikoitujen osien mekaniikka-suunnittelu SolidWorks-suunnitteluohjelmaa hyödyntäen. Suunniteltavat osat olivat järjestelmän takasiipi ja päätylevyt. Takasiiven ja päätylevyjen suunnittelussa tuli ottaa huomioon kenttätestijärjestelmän vaatima säätömahdollisuus. Säädetävyydellä pyrittiin mahdollistamaan sensorikalvon testaaminen monella takasiiven kohtauskulmalla. Opinnäytetyön tavoitteena oli myös suunnitella ilmanopeusmittarin ja savukokeen sijainnit sekä kiinnitysmekanismit kenttätestijärjestelmässä. Savukonetta ja ilmanopeusmittaria tuli myös olla mahdollisuus säätää järjestelmässä.

Vaadittavien osien suunnittelussa onnistuttiin hyvin ja kaikki tavoitteena olleet osat saatiin mallinnettua suunnitelmien mukaan. Takasiiven mallinnuksessa käytettiin NACA-siipiprofiilimallia, joka vastasi ominaisuuksiltaan vaadittua. Profiiliin tuli olla ennen kaikkea symmetrinen, ja valmis profiilimalli edesauttoi suunnittelua. Takasiiven profiilista saatiin mallinnettua muodoltaan symmetrinen ja aerodynaaminen. Siipiprofiilin piiri mitoitettiin vastaamaan A5-paperiarkin pituutta.

Takasiipeen mallinnettiin seitsemän profiilia, joiden etäisyydet toisistaan määriteltiin sensorikalvon eli A5-paperiarkin kokoa vastaaviksi. Siipiprofiilin mitoitukset onnistuivat suunnitellusti. Siipiprofiilin säädettävyys toteutui myös suunnitellusti laitimmaisten siipiprofiilien kiinnitysmekanismien avulla. Siipiprofiilien materiaaliksi valittiin polyuretaani, joka materiaalina sopi käyttötarkoitukseen. Takasiiven materiaalina voisi käyttää myös 3D-tulosteisia muovimateriaaleja.

Päätylevyjen suunnittelussa korostui materiaalivalinta. Materiaalin tuli mahdollistaa kohtauskulmaltaan säädettävän takasiipiprofiilin kiinnitys ruuveilla. Päätylevyissä käytettiin kahta materiaalia, sillä toisen päätylevyn tuli olla läpinäkyvä mahdollistaakseen savukoneen tuottaman pyörteilyn kuvaamisen kameralla. Materiaaleina käytettiin polyuretaania ja kirkasta polykarbonaattia. Päätylevyjen materiaalina voisi käyttää myös muita muovimateriaaleja, joita vasten mahdollistuu tarvittaessa pyörteiden kuvaaminen kameralla.

Opinnäytetyön kolmas keskeinen suunnittelun osa-alue oli suunnitella ratkaisu ilmanopeusmittarin ja savukoneen sijoittamiselle kenttätestijärjestelmään. Ratkaisuna suunniteltiin etusiipi, johon integroitiin ilmanopeusmittari ja savukoneen tuottamalle savulle ulostulo kulmansäätömekanismilla. Etusiiven suunnittelussa hyödynnettiin samaa valmista siipiprofiilimallia kuin takasiiven suunnittelussa. Etusiiven myötä kenttätestijärjestelmästä saatiin kokonaisuudessaan aerodynaamisempi ja takasiiven sensorikalvon alueen mahdolliset häiriöpyörteilyt saatiin minimoitua. Etusiiven profiilia voisi vastaisuudessa kehittää nykyistäkin aerodynaamisemmaksi, jottei takasiiven sensorikalvolle kohdistuisi lainkaan häiriöpyörteilyä.

Mekaniikkasuunnittelun jälkeen mallinnettuja osia testattiin kenttätestijärjestelmässä simuloinnin avulla. Simulointi osoitti kenttätestijärjestelmän toimivan toivotulla tavalla ja simuloinnin tuloksia voidaan hyödyntää vertailutuloksina käytännön testeille. Simulointia voisi mahdollisesti hyödyntää enemmänkin vastaavanlaisissa mekaniikkasuunnittelun työprosesseissa eri testivariaatioin.

Opinnäytetyön yhteistyöyritys voi hyödyntää kenttätestijärjestelmää omissa tuotekehitysprosesseissa myös tulevaisuudessa esimerkiksi painetun elektroniikan testaamisessa. Takasiipeen sijoitetun sensorikalvon paikkaa voidaan siirtää haluttuun osaa siipeä tai kalvoja voidaan vastaavasti sijoittaa haluttu määrä takasiipeen. Kenttätestijärjestelmää voidaan sovelletusti hyödyntää erikokoisina versioina myös muualle asennettuina kuin auton katolle.

LÄHTEET

1. Haltian in brief. 2014. Haltian Oy. Saatavissa: <https://www.haltian.com/Company/Media>. Hakupäivä 10.4.2017.
2. PrinLab – A development laboratory for printed electronics. 2015. Oulun ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://www.oamk.fi/hankkeet/prinlab/>. Hakupäivä 22.3.2017.
3. PrinLab – RDI Laboratory for Printed Electronics. 2017. Esite. Oulun ammattikorkeakoulu.
4. Pahl, Gerhard – Beitz, Wolfgang 1990. Koneensuunnitteluoppi. Helsinki: Suomen Metalli-, Kone- ja Sähköteknisen Teollisuuden Keskusliitto, MET.
5. Tuomala, Jorma 1995. Luova koneensuunnittelu. Tampere: Tammertekniikka ky.
6. Hoffren, Jaakko – Laine, Seppo – Renko, Kari 2006. Lentokoneen aerodynamiikka ja lentomekaniikka. Helsinki: WSOY.
7. Keinänen, Toimi – Kärkkäinen, Pentti 2009. Automaatiojärjestelmien hydraulikka ja pneumatiikka. Helsinki: WSOY.
8. Viitala, Jari 2017. T312403 Tulevaisuuden materiaalit 3 op. Opintojakson materiaali. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu.
9. Suganuma, Katsuaki 2014. Introduction to Printed Electronics. New York: Springer.
10. Jokinen, Tapani 1991. Tuotekehitys. Helsinki: Kyriiri Oy.
11. Ullman, David G. 2010. The Mechanical Design Process. New York: The McGraw-Hill Companies.
12. Kuosmanen, Matti 2017. Aerodynamiikka – Peruskäsitteet ja määritelmät. Saatavissa: <http://auster.dyndns.info/UPL/Aerodynamiikka.pdf>. Hakupäivä 22.4.2017.

13. Väyrynen, Timo 2015. T318104 Tuotekehitys 4 op. Opintojakson luentomateriaali syksyllä 2015. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu.
14. Haapanen, Erkki 2004. Tuulivoimatekniikka. Saatavissa: <http://slideplayer.fi/slide/1902537/>. Hakupäivä 9.5.2017.
15. Varje, Jari 2002. Siiven tekniikkaa. Saatavissa: <http://www.seepia.org/html/seepia5/siipi/siipi.shtml>. Hakupäivä 9.5.2017.
16. Airfoil Tools. 2017. NACA Airfoils. Saatavissa: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>. Hakupäivä 27.1.2017.

